

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

(Очерк к 150-летию открытия Араго поляризации света
дневного неба и 100-летию открытия Гови поляризации света
при рассеянии)

Г. В. Розенберг

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	173
2. Загадка дневного неба и открытие рассеяния света	175
3. Описание света и свойств среды в акте рассеяния	182
4. Атмосферная прозрачность и аэрозоль	187
5. Поляризационная карта неба, анизотропия молекул и многократное рассеяние	192
6. Яркостная карта неба и функция рассеяния	197
7. Оптическое зондирование атмосферы и проблема интерпретации данных	203
8. Распространение света в облаках и туманах и смежные проблемы	208
9. Радиационная климатология и оптика аэрозоли	209

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферная оптика принадлежит к числу древнейших наук, истоки которых теряются в доисторических временах. Многообразные световые явления в атмосфере — переменчивая лазурь неба, красочные зори, радуги и необычайные гало, фантастические миражи — давно пленяли поэтическое воображение, превращавшее их в предметы религиозных культов. Но уже в древнейших памятниках материальной культуры и свидетельствах историков обнаруживаются следы пытливого мысли, тщающейся отыскать за мистическими покровами истинную природу явлений. Во все времена на этом поприще подвизались самые выдающиеся умы. Благодаря им атмосферная оптика неизменно занимала видное место в процессе познания природы, никогда не отступая в научное захолустье. Правда, ее развитие нередко бывало отмечено грубыми заблуждениями и курьезами, но здесь она не составляет исключения. Гораздо важнее то, что с ней связано много крупнейших открытий, оказавших решительное влияние на историю науки. Достаточно, например, вспомнить, что именно из попыток объяснить голубой цвет неба (о чем речь впереди) возникла одна из важнейших и обширнейших областей современной физики — учение о рассеянии излучения веществом. Точно так же измерения прозрачности земной атмосферы, как известно, принесли в начале нашего века одно из решающих доказательств существования молекул и справедливости кинетической теории газов. Широко известна и та роль, которую сыграло открытие селективного поглощения света атмосферой в развитии спектроскопии.

Число подобных примеров нетрудно умножить. Нетрудно также видеть, что основным фактором, определяющим такую роль исследований в области атмосферной оптики, являются масштабы земной атмосферы, позволяющие выполнять гораздо более тонкие наблюдения, чем это осуществимо (при той же измерительной технике) в лабораторных условиях. Именно этим обстоятельством определяется основная, на наш взгляд, черта атмосферной оптики как науки. Оставляя в стороне многочисленные и во многом весьма актуальные задачи прикладного характера, мы обнаруживаем, что развитие атмосферной оптики всегда было непосредственно связано с наиболее передовыми достижениями теоретической мысли и экспериментальной техники, а иногда и предвзяло их, и что основные трудности этой науки были всегда трудностями общезначимыми. Напомним, в частности, что именно в связи с запросами атмосферной оптики и оптики планетарных и звездных атмосфер возникла и получила развитие теория распространения (переноса) излучения в рассеивающей среде, приобретая ныне огромное значение в прикладной ядерной физике и уже обособляющаяся в особую ветвь математической физики. Нельзя не упомянуть также о непосредственной связи развития учения о турбулентности с исследованиями мерцания звезд и других удаленных источников света. Наконец, мы скоро увидим, что основные проблемы исследования оптических свойств атмосферы не только теснейшим образом переплетаются с наиболее актуальными вопросами коллоидной оптики, но и весьма близки (во всяком случае методически) к фундаментальнейшим задачам современной ядерной физики. Это ведет, в частности, к тому, что решение (и даже корректная постановка) целого ряда, казалось бы, сугубо классических задач атмосферной оптики оказывается невозможным без привлечения наиболее передовых идей современной теоретической физики.

Практическое значение атмосферной оптики также гораздо шире, чем это может показаться на первый взгляд. Оптические свойства атмосферы в значительной мере определяют ее световой и тепловой режимы, а тем самым и световой и тепловой режимы земной поверхности, посевов, инженерных сооружений и т. п. Знание этих режимов и умение прогнозировать их изменения крайне необходимы как для развития методов прогноза погоды, так и при решении всех задач, связанных с условиями видимости, освещения и облучения, включая насущные запросы транспорта, строительства, медицины и агробиологии. Кроме того, оптические методы могут служить для исследования самой атмосферы (включая и мало еще доступную для других методов стратосферу) и происходящих в ней процессов. Это имеет прямое метеорологическое значение и приобретает особую важность в связи с развитием стратосферных средств транспорта и назревающей необходимостью исследования планетарных атмосфер извне для обеспечения возможности проникновения сквозь них (на поверхности планет) космических кораблей.

Однако, если обратиться к развитию атмосферной оптики за последние полстолетия, то открывается довольно своеобразная картина. С одной стороны, за это время, особенно за последние два десятилетия, наши сведения об атмосфере и, в частности, об ее верхних слоях испытали разительный прогресс, потребовавший радикального пересмотра большинства еще недавно общепринятых представлений. Этому сопутствовало бурное вторжение в область атмосферной оптики современных физико-математических средств исследования, во многом изменивших облик этой науки. С другой стороны, традиционные цели и направления исследования почти не испытывали веяний времени. Идеальные программы современных исследований сохраняют, в основном, те же черты, что и в начале века, отличаясь

преимущественно масштабом и техникой выполнения, а не постановкой задач.

Такой конфликт между старомодностью господствующих устремлений и крайним модернизмом способов их реализации имеет вполне закономерные основания, которые будут ясны из дальнейшего. Однако это не снимает необходимости его преодоления путем серьезного пересмотра как целей, так и методологии атмосферно-оптических исследований, тем более, что этот конфликт находит свое конкретное выражение в целом ряде явно болезненных фактов.

В частности, для современной атмосферной оптики характерен полный разрыв между теорией, нередко весьма рафинированной, и экспериментом, порой весьма тонким и совершенным. Как правило, они развиваются весьма энергично, но практически независимо друг от друга, минуя решающий этап взаимного контроля. Вместе с тем становится нередкой такая ситуация, когда стоимость экспериментальных или теоретических исследований существенно превышает ценность получаемых результатов — итог, являющийся материальным выражением несоответствия общей направленности исследований, их методики и природы объекта. Ниже мы убедимся, что в основе этого несоответствия лежит, в первую очередь, недоучет тех особенностей, с которыми связан переход от пассивного, преимущественно качественного, наблюдения природных явлений к целеустремленному количественному анализу их физической природы в условиях неконтролируемой изменчивости самого объекта исследования — атмосферы.

Таким образом, в процессе своего весьма интенсивного развития атмосферная оптика отчетливым образом пришла на рубеж, требующий серьезного пересмотра как программ, так и методов исследования. Поэтому целесообразно обсудить кратко, но в историческом аспекте современное состояние этой науки, что и является целью данной статьи. Необходимость подобного обзора усугубляется тем, что за последние годы ведущая роль в атмосферно-оптических исследованиях все более и более явно переходила к советским ученым и что, несмотря на это, в течение долгих лет вопросы атмосферной оптики оставались практически не освещенными в отечественной литературе. Однако мы строго ограничимся только одним достаточно обширным кругом проблем, а именно, проблемами, касающимися свойств атмосферы как рассеивающей среды и непосредственно восходящими тем самым к двум замечательным открытиям, упомянутым в подзаголовке.

§ 2. ЗАГАДКА ДНЕВНОГО НЕБА И ОТКРЫТИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Исследования цвета и поляризации дневного безоблачного неба в связи с открытием и объяснением явлений рассеяния света образуют одну из интереснейших страниц истории науки. Подробное, хотя и несколько сбивчивое и во многом уже архаичное, описание раннего этапа этих исследований — примерно до первого десятилетия нашего века — можно найти в известных, но давно ставших библиографической редкостью учебниках атмосферной оптики^{1,2}.

Поэтому мы остановимся только на некоторых, наиболее важных моментах, без знания которых невозможно правильно оценить современное состояние атмосферной оптики как науки.

Трудно сказать, когда впервые возникло представление о том, что яркость и цвет дневного неба обусловлены «отражением» света Солнца от воздуха или содержащихся в нем частиц — капель, пылинок. Мы находим его уже четко сформулированным у одного из пионеров

экспериментальной физики—Альгазена³ (XI в.) и, позднее, у Кеплера⁴ и Леонардо да Винчи⁵. Этим же взглядов придерживался Ньютон⁶ и, вслед за ним, Мариотт, Бугер, Эйлер⁷, Гете⁸, Клаузиус⁹ и др.

Такая точка зрения была господствующей, но отнюдь не единственной, и даже в наше время еще делаются попытки противопоставить ей, хотя бы частично, иные представления. Так, некоторые авторы, в том числе Брюстер и др., а на исходе XIX в. Шапюи¹⁰ и Шпринг¹¹, полагали, что синева неба целиком обусловлена селективным поглощением света воздухом или содержащимися в нем твердыми и газообразными примесями, (например, озоном). Другие авторы — Лаллеман¹², Гартли¹³ и др., совсем уже недавно Кон¹⁴ и даже в 1953 г. группа американских авторов¹⁵—пытались искать причину синевы дневного неба в разнообразных явлениях фото- и катодолюминесценции. Наконец, длительное время, вплоть до восьмидесятых годов прошлого столетия, т. е. значительно позже, чем были выполнены первые спектрофотометрические измерения безоблачного неба, существовали гипотезы о том, что причина его голубизны лежит в области особенностей зрительного восприятия и не имеет физической природы. В частности, еще в 1885 г. Пикеринг¹⁶ опубликовал описание опытов, специально поставленных с целью опровержения этой гипотезы.

Не следует, однако, рассматривать названные гипотезы, явно несостоятельные с современной точки зрения, только как исторические курьезы. Их популярность и устойчивость перед критикой противников убедительно свидетельствует о серьезных трудностях, возникавших на пути объяснения свечения дневного неба рассеянием света. Предметом наибольшего внимания при этом была его окраска.

Заметим, кстати, что еще большие трудности встретило объяснение синевы моря и других водоемов. Со времен Бунзена, обратившего внимание на резко выраженную селективность поглощательной способности воды, обеспечивающую ее зеленовато-голубую окраску в проходящем свете, укоренилась точка зрения, что цвет моря объясняется именно этим обстоятельством. Настойчиво эту концепцию отстаивали на рубеже XX в. Ауфзесс¹⁷ и Пайтенполь¹⁸, подчеркивавшие возможность дополнительного окрашивания вод всевозможными примесями. После работ Шварцшильда, Шустера и др. по теории распространения света в рассеивающих средах было нетрудно видеть, что такое объяснение несостоятельно, ибо в отсутствие рассеяния глубокие водоемы вообще не отражали бы света и выглядели бы черными независимо от спектра поглощения воды. Однако противоположная точка зрения, согласно которой цвет моря следует объяснять рассеянием (молекулярным или на содержащихся в воде примесях — пузырьках, планктоне и т. п.), хотя и выдвигалась рядом авторов, оказалась еще менее жизнеспособной. Из тех же теоретических соображений следовало, что в отсутствие поглощения любой закон рассеяния ведет к независимости отражательной способности водоема от длины волны, т. е. моря были бы белыми наподобие облаков.

В действительности, как известно, цвет моря и других водоемов определяется совокупным действием обоих факторов. Впервые это было показано только в 1921 г. независимо Раманом¹⁹ и Шулейкиным²⁰, а строгий теоретический анализ выполнен лишь в сороковых годах Амбарцумяном, Чандрасекаром, Соболевым и др.²¹ При этом до сих пор остается не вполне ясной роль флуоресценции в окраске водоемов.

Мы не станем останавливаться на первой попытке проникнуть в тайну объяснения небесной лазури, предпринятой Леонардо да Винчи. Попытка эта исходила из распространенного в его времена мнения, что цвет определяется пропорцией, в которой смешиваются свет и мрак, и не пред-

ставляет сейчас интереса. Точно также мы не станем обсуждать гипотезу, согласно которой цвет неба определяется собственной окраской частиц воздуха или содержащихся в нем примесей. Эта гипотеза, которой придерживался, в частности, Эйлер, опровергалась различием окраски атмосферного воздуха в проходящем и отраженном свете и не играла в XIX в. сколько-нибудь заметной роли.

Наибольшее распространение в первой половине XIX в. имела точка зрения Ньютона, согласно которой голубой цвет неба возникает в результате интерференции света при отражении его от содержащихся в воздухе мельчайших водяных капель, наподобие интерференционной окраски тонких пленок. В середине XIX в. Клаузиус⁹ выдвинул против гипотезы Ньютона весьма веские для своего времени, но, как мы теперь понимаем, не всегда оправданные возражения. В основном они сводились к следующему. Если вода действительно содержится в воздухе в виде капель, обеспечивающих появление столь интенсивной интерференционной окраски неба, то дифракционные явления на этих каплях должны привести к образованию мощных ореолов, т. е. существенному размыванию контуров небесных светил, что при ясном небе не наблюдается. Кроме того, Клаузиусу показалось необъяснимым, каким образом вообще капли воды могут плавать в воздухе и почему, если это действительно водяные капли, не наблюдается радуг в облаках и туманах. Это побудило Клаузиуса предпринять попытку спасти гипотезу Ньютона, заменив в ней капельки воды тонкостенными пузырьками с их характерной интерференционной окраской. При увеличении влажности толщина стенок пузырьков, по мнению Клаузиуса, должна возрастать, обуславливая побеление отражаемого пузырьками света. Последовавшее вскоре открытие рассеяния света заставило Клаузиуса отказаться от своей гипотезы, но она еще долго оставалась предметом дискуссии. В частности, еще в 1883 г. ее активным защитником выступал Мюллер²², сделавший попытку усовершенствовать представление об интерференционной природе голубого цвета неба путем учета эффектов многократного отражения от пузырьков.

Однако не только в несовершенствах самой идеи о том, что атмосфера, с неизменно содержащимися в ней водяными каплями и пылинками, представляет собой мутную среду (коллоид) и что цвет неба определяется условиями «отражения» света от помутняющих атмосферу частиц, следует видеть причину тех трудностей, с которыми она пробивала себе дорогу среди конкурирующих предположений. Гораздо большую роль в этом играли, с одной стороны, хорошо известное в те времена резкое различие между характером явлений, наблюдаемых при прохождении света через мутные среды — облака и туманы — и картиной ясного голубого неба, и, с другой стороны, полное отсутствие лабораторных экспериментов, хотя бы в какой-нибудь степени моделирующих небесную лазурь. Следует заметить, что в первой четверти XIX в. не только были уже хорошо известны и, в основном, правильно поняты наиболее выразительные особенности радуг и разнообразных гало, но и была вскрыта Жорданом и подробно рассмотрена Фраунгофером дифракционная природа венцов. Укажем также, что незадолго до того (в 1790 г.) Соссюром²³ был сконструирован первый прибор для количественного измерения синевы неба и был выяснен характер ее изменения от зенита к горизонту. В 1799 г. эти измерения были продолжены Гумбольдтом, а затем настойчиво повторялись в различных вариантах целой группой авторов вплоть до наших дней. Обнаруженные при этом различия между оптическими явлениями в облаках и туманах и при ясном небе были столь разительными, что почти не оставляли сомнений в необходимости искать для них принципиально различных объяснений.

Первая попытка лабораторного исследования оптических свойств мутной среды была предпринята Гете⁸ и имела своей целью именно моделирование голубого цвета неба. Однако объект наблюдения — нижняя несамосветящаяся часть освещенного солнцем пламени спирта — был выбран им неудачно и, несмотря на качественное подтверждение основной идеи (на белом фоне наблюдалась голубоватая, а на черном фоне — синеватая окраска), опыт Гете не мог рассматриваться как убедительный, особенно будучи «подкреплён» его ошибочными представлениями о природе цвета.

Успешное лабораторное моделирование голубого цвета неба было впервые осуществлено Брюкке²⁴ в 1853 г. Освещая водную эмульсию гуммиарабика и наблюдая ее на фоне черного экрана, Брюкке обнаружил ярко-голубую окраску, тогда как в проходящем свете эмульсия имела красновато-желтый цвет. Тем самым Брюкке экспериментально показал, что в оптических свойствах эмульсий можно искать объяснения окраске небесного свода и характерному покраснению Солнца при его приближении к горизонту.

В 1860 г. последовали опыты Гови²⁵ с дымами от винного спирта и табака, причем оказалось, что при рассеянии света в дымах цветовые эффекты сильно притушены, подобно тому, как это наблюдается при рассеянии света облаками и туманами. Наконец, в 1869 г., т. е. через 16 лет после опытов Брюкке, Тиндаль²⁶ выполнил свои красочные и быстро получившие широкую известность опыты с так называемыми «актиничными облаками». Суть опытов заключалась в том, что в результате химического разложения паров некоторых соединений в освещенном сосуде получалось облачко аэрозоля, частицы которого постепенно росли. Рост частиц проявлялся, в частности, в изменениях окраски рассеянного им света — наблюдался постепенный переход от лазурно-голубого, полностью воспроизводящего окраску южного неба, к белесому, характерному для облаков, дымов и туманов.

Итак, опыт Брюкке, как справедливо отметил в том же 1853 г. Клаузиус²⁷, продемонстрировал, что отражение света от малых частиц происходит по иным законам, чем от массивных тел, т. е. что в случае малых частиц имеет место уже не отражение света, а иное явление, получившее название рассеяния. Далее, опыты Брюкке, Гови и Тиндаля показали, что характер рассеяния существенно зависит от характера рассеивающих частиц, в том числе, и от их размера. Так появились веские аргументы против теории Ньютона — Клаузиуса, на что и указал последний²⁷. Однако решающих доводов в пользу объяснения яркости и цвета дневного неба рассеянием опыт Брюкке не принес. Голубизна рассеянного коллоидом света свидетельствовала лишь о допустимости подобного объяснения, но отнюдь не доказывала его справедливости. Доказательства следовало искать в иных направлениях, и они не заставили себя ждать.

Еще в 1809 г. Франсуа Араго²⁸, рассматривая дневное небо через призму Николя, обнаружил, что поступающий от неба свет сильно поляризован. При этом поляризованным оказался не только свет неба, но и свет дымки, отделяющей наблюдателя от удаленных предметов, например, гор. Поэтому не оставалось сомнений, что поляризовано само свечение воздуха (или содержащихся в нем примесей). В течение последующих 150 лет это явление неизменно служило объектом настойчивых и весьма многочисленных исследований, о результатах которых речь пойдет ниже. Но все попытки его объяснения, исходя из представления об отражении солнечных лучей частицами воздуха или содержащихся в нем примесей, предпринятые Араго, Бабинем, Брюстером, Клаузиусом и др.,

оказались безуспешными. Это было, в частности, в свое время веским аргументом против представлений Ньютона—Клаузиуса. Не лучше обстояло дело и в отношении конкурирующих гипотез, из которых упомянем лишь о гипотезе Брюстера²⁹, активно поддержанной Рубенсоном⁶⁸. Исходя из того, что обнаруженный Араго и детально исследованный Брюстером и Рубенсоном максимум поляризации света дневного неба располагается в вертикале Солнца под углом рассеяния ϕ около 90° (это примерно соответствует двойному углу Брюстера на границе двух сред с близкими показателями преломления), эти авторы высказали убеждение, что отражающей субстанцией являются не чужеродные частицы, а сами молекулы воздуха.

Разрешение пугающей загадки поляризации свечения дневного неба потребовало целых полвека и было впервые получено в уже упомянутых опытах туринского астронома профессора Гови²⁵. Исследование, результаты которого излагаются в виде двух кратких сообщений в Докладах Парижской академии наук, было предпринято с прямой целью доказать, что свечение дневного неба обусловлено рассеянием света и что тем же явлением объясняется свечение кометных хвостов, свет которых тоже поляризован. Гови заполнял зачерненную и тщательно затененную комнату различными дымами и через прорезь в ставнях направлял в нее целостатом пучок солнечных лучей. Наблюдая светящийся столб через полярископ, Гови обнаружил, что рассеянный свет сильно поляризован, причем максимум поляризации оказался сдвинутым относительно угла рассеяния 90° . Последующими опытами Гови установил, что если изменить угол рассеяния в широких пределах, то обнаруживаются направления, в которых рассеянный свет полностью деполаризован (нейтральные точки по терминологии Араго), и интервалы углов, где плоскость поляризации повернута на 90° относительно плоскости рассеяния (отрицательная поляризация по терминологии Араго). В § 5 мы увидим, что оба эти обстоятельства характерны для свечения дневного неба (на что указывает Гови) и были впервые обнаружены Араго. На основании своих опытов Гови отчетливо формулирует вывод, что рассеяние света на малых частицах не имеет ничего общего с отражением света и представляет собой самостоятельное явление.

Через девять лет появилась знаменитая работа Тиндаля²⁶ под названием «О голубом цвете неба, поляризации свечения неба и поляризации света облачным веществом вообще». Наряду с упомянутыми уже сведениями о влиянии размеров рассеивающих частиц на окраску рассеянного ими света Тиндаль сообщает в ней результаты своих весьма тщательных поляризационных измерений. Им установлено, что характер поляризации резко изменяется с ростом размеров частиц. Если частицы очень малы (ярко голубой цвет рассеянного света), то степень поляризации велика и максимум ее наблюдается при угле рассеяния 90° . С увеличением размера частиц (побелением рассеянного света) степень поляризации уменьшается, а максимум смещается в сторону, причем, в согласии с Гови, обнаруживаются «нейтральные точки» и области «отрицательной поляризации». Теперь уже свет, рассеиваемый коллоидами в лабораторных условиях, и свет, поступающий от небосвода, обнаруживали, по крайней мере, две общие черты — характер окраски и характер поляризации. Это дало Тиндалю достаточно веские основания для предположения о тождественности этих явлений, что тотчас же привлекло к ним особое внимание.

Вместе с тем было сделано важнейшее по своим последствиям открытие — обнаружено изменение поляризации (т. е. спина) излучения в акте рассеяния его веществом. Как видно из сказанного, это открытие было

сделано в 1809 г. Араго в полевых условиях, но было понято с запазданием на полвека только после независимых лабораторных опытов Гови. Добавим, что история оказалась несправедливой к обоим ученым. Значение открытия Араго, ставшего, по существу, одним из краеугольных камней строительного здания современной молекулярной оптики, ускользнуло от внимания последующих поколений. Блестящие же опыты Тиндаля не только подтвердили замечательные открытия Брюкке и Гови, но и затмили их — за явлением рассеяния света коллоидами незаслуженно, но прочно укоренилось название «явления Тиндаля».

Вместе с тем опыты Тиндаля вновь пробудили активный интерес к проблеме дневного неба. Едва минуло два года, как Релей, (тогда еще Стрэт), начал публикацию серии статей, посвященных теоретическому обсуждению этой проблемы и образовавших основу будущей науки о рассеянии излучения веществом³⁰. При этом Релей исходил из представления, что рассеяние света происходит (аналогично опыту Тиндаля) на взвешенных в воздухе малых частицах (предположительно, сферической формы), и рассматривал световые волны как волны в упругом эфире. Позднее, в 1899 г. он воспроизвел свою теорию уже на основе электромагнитной теории света³¹, что, впрочем, не изменило основных выводов: 1) вне полос поглощения рассеивающих частиц интенсивность света, рассеиваемого частицами, размеры которых много меньше длины световой волны λ , пропорциональна λ^{-4} и 2) степень поляризации p рассеянного света зависит от угла рассеяния φ и равна

$$p = \frac{\sin^2 \varphi}{1 + \cos^2 \varphi}. \quad (1)$$

Естественно, тотчас возникло стремление сопоставить эти выводы с наблюдениями дневного неба. В части, касающейся окраски дневного неба, такие измерения впервые были выполнены самим Релеем и, вслед за ним, Фогелем, Крова, Цетвухой, Боком и, особенно тщательно, в 1886 г. Абнеем и Фестингом. Измерения показали, что при очень ясной погоде спектральное распределение яркости дневного неба примерно соответствует закону $\sim \lambda^{-4}$, но что даже в наиболее благоприятных случаях отклонения достигают заметной величины. Что касается поляризации, то довольно хорошо уже изученная к этому времени поляризационная карта небосвода в целом приблизительно соответствовала формуле (1), отличаясь, однако, от теоретических ожиданий в ряде существенных деталей. Наконец, спектральные измерения прозрачности атмосферы, выполненные, в частности, Абнеем и Фестингом, а также Беккерелем, в восьмидесятых годах прошлого века, вновь показали, что при очень высокой прозрачности атмосферы атмосферное ослабление света меняется с длиной волны также в приближенном соответствии с релеевским законом $\sim \lambda^{-4}$ (в отличие от пропорциональности λ^{-2} , вытекавшей из теории Клаузиуса), но с весьма существенными и переменчивыми отклонениями от него. Ниже мы вернемся к обсуждению природы всех этих отклонений, здесь же заметим только, что столь хорошее полуквантовое совпадение спектральных и поляризационных характеристик поступающего от небосвода света с теоретическими предсказаниями уже могло рассматриваться в качестве убедительного свидетельства в пользу справедливости объяснения свечения дневного неба как рассеяния света Солнца взвешенными в воздухе малыми частицами.

Сам Релей, однако, в работе 1899 г. уже отходит от этого предположения и выдвигает гипотезу, что рассеивающими частицами являются сами молекулы воздуха³¹. Этот шаг, возвращавший к идеям Брюстера, был тем более смелым, что Тиндаль прямо утверждает, что по его изме-

рениям воздух, лишенный пыли и водяных капель, совершенно не рассеивает света²⁶. Вокруг этой гипотезы, как известно, вскоре завязалась знаменитая дискуссия между Л. И. Мандельштамом и М. Планком³², итогом которой было создание в 1908—1910 гг. флуктуационной теории рассеяния света³³. Последняя, в частности, показала, что, несмотря на вскрытую Л. И. Мандельштамом ошибочность исходного предположения Релея о некогерентности волн, рассеянных отдельными молекулами, установленная Релеем связь между рассеивающей способностью среды и ее показателем преломления справедлива. Тем самым получила надежную основу и теория рассеяния света в мелкодисперсных коллоидах, выдвинутая в 1904 г. Максвелл-Гарнеттом³⁴ и качественно объяснившая цвета коллоидальных растворов. Исходным в этой теории было предположение, что если коллоидальные частицы и расстояния между ними малы по сравнению с длиной волны, то среде можно приписать показатель преломления, который будет связан с поляризуемостью отдельных частиц формулой Лорентц—Лоренца. Таким образом, содержание теории Максвелл-Гарнетта, в основном, сводилось к учету кооперативных (а именно, дисперсионных) эффектов при рассеянии на совокупности коллоидных частиц и область ее применимости ограничивалась только крайне мелкодисперсными и очень концентрированными коллоидами, вследствие чего в атмосферной оптике эта теория не сыграла никакой роли.

То обстоятельство, что теория Релея при помощи очень простых и наглядных формул качественно правильно описала основные особенности свечения ясного дневного неба — его цвет и поляризацию, а также спектральную зависимость прозрачности атмосферы — сразу же завоевало этой теории всеобщее признание. Однако ее триумфом, не только подтвердившим гипотезу Релея, что атмосферное рассеяние света носит, в основном, молекулярный характер, но и оказавшим решительное влияние на процесс становления молекулярно-кинетических воззрений вообще, было определение числа Лешмидта из измерений прозрачности воздуха (см. § 4).

Тем не менее не существовало никаких оснований отказываться от представления, что взвешенные в воздухе аэрозольные частицы существенно влияют на оптические свойства атмосферы, тем более, что далеко не все факты объяснялись теорией Релея. В частности, с ней никак не вязалась яркостная карта дневного неба, а также существование на нем нейтральных точек.

В том же 1899 г., когда теория Релея, казалось, дала ключи к разрешению загадок дневного неба, было положено начало и теории рассеяния света на инородных частицах. Ляв³⁵ строго рассмотрел задачу о дифракции электромагнитной волны на шаре. Через 9 лет Ми³⁶ заново решил ту же задачу. Но, в отличие от Лява, он не ограничился математической стороной дела, а подробно сопоставил выводы теории с оптическими свойствами коллоидных взвесей металлов, что сразу же придало этой теории известность среди экспериментаторов.

В дальнейшем экспериментальные и теоретические исследования явлений рассеяния излучения веществом развивались весьма интенсивно и вскоре составили предмет одного из основных разделов современной науки. Но связь с проблемами атмосферной оптики отнюдь не была утрачена и влияние атмосферно-оптических задач на развитие теории рассеяния продолжало оставаться во многих отношениях решающим. Обсуждение этой связи и будет в значительной мере темой дальнейшего. Однако предварительно необходимо остановиться на том, какими параметрами надлежит характеризовать рассеивающую среду и сам акт рассеяния.

§ 3. ОПИСАНИЕ СВЕТА И СВОЙСТВ СРЕДЫ В АКТЕ РАССЕЯНИЯ

Обращаясь к явлениям рассеяния света, атмосферный воздух, как и всякий коллоид, следует характеризовать его способностью поглощать и рассеивать свет различных длин волн. Однако при ближайшем рассмотрении выясняется, что эта способность, вообще говоря, зависит не только от свойств самого воздуха, но и от характера поляризации света³⁷⁻⁴⁰. Поэтому, прежде всего, необходимо отыскивать такие оптические характеристики рассеивающей среды (в частности, атмосферного воздуха), которые отражали бы свойства последней независимо от характера светового поля. Оказывается, что это возможно только в том случае, если при описании поглощаемых и рассеиваемых световых пучков перейти от привычных напряженностей электрического и магнитного полей световой волны к иным, специализированным параметрам.

Основной особенностью, с которой мы встречаемся, рассматривая распространение света в рассеивающей среде, является множественность некогерентных между собой актов рассеяния, в результате которых происходит постоянное перемешивание световых пучков с самой различной предысторией. Поскольку в каждом акте рассеяния происходит не только угловое перераспределение мощности световой волны, но и изменение ее поляризации, постольку рассеянный свет представляет собой некогерентную статистическую смесь пучков самой различной интенсивности и весьма разнообразных по характеру поляризации.

Но от поляризации рассеиваемого света в сильнейшей степени зависит характер и результат акта рассеяния. Поэтому в задачах о рассеянии излучения последнее следует характеризовать параметрами, аддитивными для некогерентных световых пучков и исчерпывающе описывающими как их энергетику, так и состояние их поляризации. Такие параметры были впервые предложены Стоксом⁴¹ в 1852 г., т. е. еще до открытия рассеяния света, и надолго были преданы забвению «за ненадобностью». Впоследствии они в различных вариантах возникали в трудах Релея, Пуанкаре, Беккереля, Винера, Солейе и др. в связи с некоторыми «экзотическими» задачами, но оставались совершенно неизвестными широким

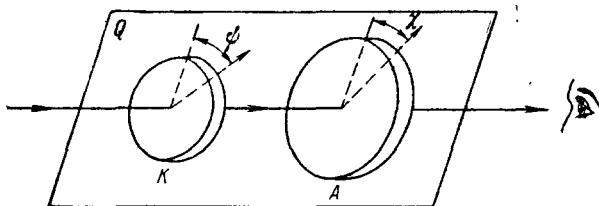


Рис. 1.

кругам физиков. Интерес к ним возродился только в сороковых годах именно в связи с задачами о рассеянии и распространении света в мутных средах и, в первую очередь, в атмосфере^(42-47 и др.; подробнее см. 38). Вскоре оказалось, что параметры Стокса самым непосредственным образом связаны с квантовомеханической матрицей плотности излучения и представляют собой, по существу, ее исторически первую формулировку. В этой связи нельзя не отметить, что даже сама корректная постановка такой сугубо классической задачи, как многократное рассеяние света в атмосфере, была полностью невозможной без привлечения наиболее типичного аппарата квантовой механики — матрицы плотности.

Минуя позднейшие обобщения параметров Стокса (см., например,³⁸), мы можем ввести их в простейшей форме следующим образом^{44,47}, связав их непосредственно с одной из возможных и наиболее удобных процедур измерения. Допустим, что на пути светового пучка последовательно располагаются компенсатор K , вносящий разность хода в четверть длины волны, и анализатор A (рис. 1). Выберем произвольную плоскость референции Q , включающую направление луча, углы поворота компенсатора ψ и анализатора χ вокруг направления светового луча будем отсчитывать от плоскости Q против часовой стрелки, если смотреть навстречу лучу. Тогда, по определению, параметрами Стокса светового пучка называются величины:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= I(\psi=0, \chi=0) + I(\psi=90^\circ, \chi=90^\circ), \\ S_2 &= I(\psi=0, \chi=0) - I(\psi=90^\circ, \chi=90^\circ), \\ S_3 &= 2I(\psi=45^\circ, \chi=45^\circ) - S_1, \\ S_4 &= S_1 - 2I(\psi=0^\circ, \chi=45^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $I(\psi, \chi)$ — интенсивность света, проходящего сквозь компенсатор и анализатор при заданных значениях углов ψ и χ . Легко убедиться³⁸, что

$$S_1 = I, \quad S_2 = Ip \cos 2\psi_0, \quad S_3 = Ip \sin 2\psi_0, \quad S_4 = Iq. \quad (3)$$

где I — полная интенсивность светового пучка, p — степень его поляризации, q — так называемая степень эллиптичности поляризации и ψ_0 — угол поворота направления максимальной поляризации относительно плоскости референции Q (рис. 1 и 2).

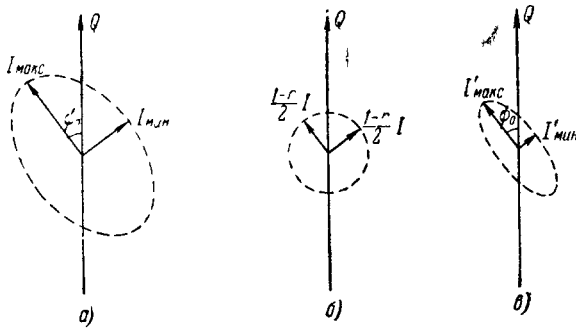


Рис. 2. а) Частично поляризованный пучок

$$I = I_{\max} - I_{\min} = I' + I'', \quad p = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I} = rp', q = rq'.$$

б) Деполяризованная компонента

$$I'' = (1 - r) I.$$

в) Полностью поляризованная компонента

$$I' = I'_{\max} + I'_{\min} = rI, \quad p' = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'}, \quad q' = \frac{2 \sqrt{I'_{\max} - I'_{\min}}}{I'}.$$

Вообще говоря, произвольный частично поляризованный световой пучок интенсивности I можно представить как сумму двух некогерентных пучков — полностью (вообще говоря эллиптически) поляризованного пучка интенсивности rI и полностью деполяризованного пучка интенсивности $(1-r)I$ (рис. 2). Величина $r \equiv \sqrt{p^2 + q^2}$ называется

величиной поляризации⁴⁸ или степенью однородности⁴⁴ светового пучка.

Четыре параметра Стокса S_i ($i=1, 2, 3, 4$) можно рассматривать как компоненты единого вектор-параметра Стокса \vec{S} в четырехмерном функциональном пространстве^{44, 38}, что существенно упрощает запись формул. Поэтому нам кажутся нерациональными разнбуквенные обозначения для параметров Стокса, обычно применяемые в иностранной литературе (например, в⁴⁰), тем более, что общепринятой системы обозначений не существует.

Если плоскость референции повернуть на угол ψ' против часовой стрелки (глядя навстречу лучу), то компоненты вектор-параметра Стокса \vec{S} изменят свои значения:

$$S'_i = \sum_j K_{ij}(\psi') S_j, \quad (4)$$

причем матрица преобразования K_{ij} имеет вид

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi' & \sin 2\psi' & 0 \\ 0 & -\sin 2\psi' & \cos 2\psi' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

и величины $S_1 = I$, p , q и r будут инвариантными относительно преобразования (5). Подробности о свойствах вектор-параметра Стокса см. в³⁸.

Проходя сквозь поглощающую и рассеивающую среду, световой пучок испытывает ослабление и, в случае анизотропии среды или наполняющих ее рассеивающих частиц, изменение характера поляризации. И то и другое записывается как изменение вектор-параметра Стокса светового пучка при прохождении им элемента пути³⁸:

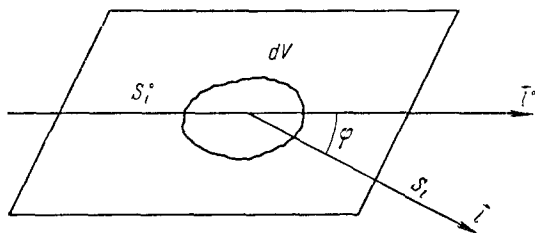


Рис. 3.

записывается как изменение вектор-параметра Стокса светового пучка при прохождении им элемента пути³⁸:

$$dS_i = - \sum_j \kappa_{ij} S_j dl, \quad (6)$$

где κ_{ij} ($i, j=1, 2, 3, 4$) — так называемая матрица экстинкции. В случае изотропной среды она вырождается в скаляр — коэффициент ослабления (экстинкции) k :

$$\kappa_{ij} = k \delta_{ij}, \quad (7)$$

где δ_{ij} — символ Кронекера (подробнее см. ³⁹).

Обратимся теперь к описанию акта рассеяния света. Допустим, что элемент объема dV облучается в направлении l^0 световым пучком с вектор-параметром Стокса \vec{S}_0 и будем рассматривать световой пучок, рассеянный элементом объема dV в некотором направлении l (рис. 3). В качестве плоскости референции Q как для рассеиваемого, так и для рассеянного пучков выберем плоскость рассеяния, включающую оба направления l^0 и l . Тогда из линейности уравнений электродинамики и из аддитивности вектор-параметров Стокса для некогерентных световых пучков следует^{37, 38, 42-44}, что компоненты вектора-параметра Стокса

рассеянного (S) и облучающего (S^0) пучков связаны соотношениями

$$dS_i(l) = \frac{1}{r^2} \sum_j D_{ij}(l, l^0) S_j^0(l^0) dV, \quad (8)$$

где r —расстояние точки наблюдения от рассеивающего элемента объема, а D_{ij} —компоненты матрицы четвертого ранга, характеризующей рассеивающие свойства среды независимо от состояния поляризации рассеиваемого света и отнесенной к единице объема. Впредь мы будем называть ее матрицей рассеяния света средой: Ее компонента D_{11} называется коэффициентом направленного светорассеяния или дифференциальным поперечным сечением рассеяния. Если рассеивающая среда изотропна (например, вследствие хаотичного распределения по ориентациям анизотропных частиц), то компоненты матрицы рассеяния D_{ij} зависят не от самих направлений l^0 и l , а только от угла рассеяния φ между ними (рис. 3). В этом (и только в этом!) случае можно ³⁷⁻⁴⁰ ввести понятие о коэффициенте рассеяния среды σ , (или о ее полном поперечном сечении рассеяния) независимом от состояния поляризации рассеиваемого света, определив его как (отнесенную к единице объема) долю мощности световой волны, облучающей рассеивающий объем dV , рассеиваемую последним во все стороны:

$$\sigma = \oint D_{11} d\omega, \quad (9)$$

где $d\omega$ —элемент телесного угла рассеянного светового пучка. Тогда вместо матрицы $D_{ij}(\varphi)$ мы можем ввести нормированную матрицу рассеяния $f_{ij}(\varphi)$:

$$D_{ij}(\varphi) = \frac{\sigma}{4\pi} f_{ij}(\varphi), \quad (10)$$

причем ее компонента $f_{11}(\varphi)$, удовлетворяющая, согласно (9), условию нормирования

$$\frac{1}{4\pi} \oint f_{11}(\varphi) d\omega = 1, \quad (11)$$

обычно называется функцией или индикатрисой рассеяния.

Но энергия, изымаемая частицей (или средой) из облучающей ее волны, не только рассеивается но и частично поглощается, превращаясь в другие формы. Очевидно, что отнесенная к единице объема среды доля облучающей ее световой мощности, поглощаемая средой, т. е. коэффициент (или поперечное сечение) поглощения среды α определяется как разность коэффициентов ослабления и рассеяния

$$k = \alpha + \sigma, \quad (12)$$

причем α будет скаляром, вообще говоря, только при изотропии среды. Заметим, что все три величины в (12) имеют размерность см^{-1} или, удобнее, км^{-1} (поперечное сечение, отнесенное к единице объема).

Весьма существенно, что величины (матрицы) α , σ и k выражаются через компоненты матриц рассеяния $D_{ij}(\varphi)$ и экстинкции κ_{ij} , вследствие чего спектральные и угловые зависимости всех $16+16=32$ компонент этих матриц исчерпывают всю информацию, которую можно получить о свойствах среды, исследуя явления рассеяния, поглощения ею света или других излучений. Тем не менее обычно отдается предпочтение прямым измерениям коэффициента экстинкции k и, в некоторых случаях, удельного коэффициента поглощения $\beta = \frac{\alpha}{\sigma}$ (подробнее см. ³⁹).

Нередко вместо матриц D_{ij} или f_{ij} удобнее рассматривать **п р и в е-**
д е н н у ю **м а т р и ц у** **р а с с е я н и я**, компоненты которой \tilde{f}_{ij}
задаются соотношениями

$$\tilde{f}_{ij}(\varphi) = \frac{D_{ij}(\varphi)}{D_{11}(\varphi)} = \frac{f_{ij}(\varphi)}{f_{11}(\varphi)}. \quad (13)$$

Вид матрицы рассеяния $D_{ij}(\varphi)$ существенно зависит от свойств рассеивающей среды, в частности, от состава, размеров, формы и ориентации взвешенных в ней частиц. Характер анизотропии среды или симметрии рассеивающих частиц непосредственно отражается на количестве независимых и отличных от нуля компонент матрицы рассеяния^{40,43,44,49}. Однако конкретный вид матрицы рассеяния известен только для молекулярного рассеяния. Для непоглощающих газов с поправками на анизотропию молекул в соответствии с теорией Релея—Кабанна (см. § 5) она имеет вид^{44, 38}:

$$f(\varphi) = \frac{3\pi}{4+3d} \begin{pmatrix} 1 + \cos^2 \varphi + d & -\sin^2 \varphi & 0 & 0 \\ -\sin^2 \varphi & 1 + \cos^2 \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (14)$$

причем коэффициент рассеяния (вследствие отсутствия поглощения $k = \sigma$) равен *)

$$\sigma = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N} \frac{4+3d}{12-d}. \quad (15)$$

Здесь φ — угол рассеяния, N — число молекул в единице объема, n — показатель преломления среды, λ — длина волны, $d = \frac{4\Delta}{1-\Delta}$ и Δ — деполяризация рассеянного света при $\varphi = 90^\circ$ и облучении рассеивающего объема линейно поляризованным светом с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости рассеяния **). Существенно, что как для облучающего, так и для рассеянного пучков в качестве плоскости референции выбрана плоскость рассеяния.

В случае рассеяния на шарообразных частицах (рассеяние Ми) при сохранении плоскости рассеяния в качестве плоскости референции Q для облучающего и рассеянного пучков

$$f(\varphi) = \begin{pmatrix} f_1(\varphi) & f_2(\varphi) & 0 & 0 \\ f_2(\varphi) & f_1(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3(\varphi) & f_4(\varphi) \\ 0 & 0 & -f_4(\varphi) & f_3(\varphi) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

т. е. матрица рассеяния содержит только 4 независимых компоненты. Как коэффициент рассеяния σ , так и компоненты матрицы рассеяния оказываются весьма чувствительными к длине волны, причем функции $f_i(\varphi)$ сложным образом зависят от угла рассеяния. Теория Ми позволяет, в принципе, рассчитать зависимости $\sigma(\lambda)$ и $f_i(\varphi, \lambda)$ для частиц данного размера и с заданным показателем преломления. Однако в действительности

*) В работе³⁸ в формуле (57) ошибочно упущен множитель $\frac{1}{2}$.

**) Нередко в формулы вместо Δ вводится величина $\varrho = \frac{2\Delta}{1+\Delta}$, т. е. деполяризации при $\varphi = 90^\circ$ и облучении естественным светом, причем иногда ее также обозначают через Δ .

эти расчеты столь громоздки, что, несмотря на использование математических машин, они выполнены только для небольшого набора случаев, преимущественно в отсутствие поглощения и исключительно для σ (или k) и $f_1(\varphi)$ (в немногих случаях также $f_2(\varphi)$). Что касается функций $f_3(\varphi)$ и $f_4(\varphi)$, то они до сих пор не рассчитывались ни разу. Следует также иметь в виду, что качественные суждения в этой области и даже интерполяция расчетных данных должны использоваться с крайней осторожностью ввиду весьма капризного характера изменения большинства вычисляемых величин.

Помимо рассеяния на сферических частицах, в принципе, рассмотрена задача о рассеянии на эллипсоидальных частицах. Прочие формы частиц вообще пока остаются недоступными для теории. Дальнейшие подробности о характере рассеяния света на крупных частицах можно найти в монографиях ^{40, 50}.

§ 4. АТМОСФЕРНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И АЭРОЗОЛЬ

Прозрачность атмосферы в различных участках спектра принадлежит к числу важнейших ее оптических характеристик. Ею определяются условия видимости отдаленных предметов и, вообще, световой режим нашего существования. От нее же зависит и радиационный и термический режимы как на земной поверхности, так и в атмосфере. Не удивительно, что со времен Бугера и Ламберта, впервые четко сформулировавших проблему, и Сосюра, впервые попытавшегося выполнить наблюдения, на измерения атмосферной прозрачности было затрачено не мало усилий. Оставляя в стороне обширный и практически важный круг оперативных и климатологических задач, выходящих за рамки статьи, мы рассмотрим накопленный в течение двух веков материал только с одной точки зрения, а именно, познания оптических свойств самой атмосферы.

Наиболее обширную категорию исследований составляют многочисленные наблюдения и измерения, выполненные метеорологами в надежде уловить какие-нибудь связи между прозрачностью и погодой и тем самым способствовать прогнозу последней. Лишенные какой-либо теоретической основы и, как правило, ограничивающиеся лишь поверхностными корреляционными оценками на основе сравнительно кратковременных наблюдений, выполняемых к тому же лишь в благоприятных метеорологических условиях, эти измерения не принесли, с интересующей нас точки зрения, никаких зримых плодов. Помимо некоторого количества любопытных наблюдений, тонущих в обширной и пестрой коллекции разнообразных и не поддающихся научному анализу случаев, из них можно извлечь только убеждение в крайней и совершенно неконтролируемой изменчивости оптического состояния атмосферы, даже в совершенно ясные дни.

Столь же скудными по результатам оказались и неоднократные измерения прозрачности, выполненные астрономами с целью учесть помехи, чинимые в их исследованиях земной атмосферой. Вопреки общезвестным фактам, в этих измерениях, как правило, игнорировалась изменчивость атмосферы и усилия направлялись на определение некоей средней (в лучшем случае сезонной), якобы характерной для данной обсерватории, прозрачности в ясные дни, т. е. величины, не имеющей, как мы увидим ниже, реальной ценности.

На этом весьма разнородном по целям и приемам исследования фоне выделяется сравнительно немного работ, отчетливо устремленных на исследование оптических свойств самой атмосферы и отличающихся продуманностью методики и совершенством использованной аппаратуры.

Рамки статьи не позволяют отдать должное каждой из этих работ, оставивших заметный след в науке. Ниже лишь бегло обрисованы современные сведения, относящиеся к прозрачности атмосферы, и отмечены некоторые, вытекающие из них следствия. При этом мы оставим в стороне обширный и имеющий самостоятельное значение вопрос о селективном поглощении газовой фазы атмосферы, включая такие ее примеси, как водяной пар, озон и углекислота.

Мы не станем касаться также отнюдь не простых и еще очень далеких от удовлетворительного решения вопросов методики и техники выполнения измерений прозрачности (см., например,⁵¹ и указанную там литературу). Отметим только, что измеряется обычно либо коэффициент ослабления k , усредненный по более или менее длинной (чаще, горизонтальной) трассе, либо вертикальная оптическая толщина атмосферы над головой наблюдателя (находящегося на высоте h)

$$\tau(h) = \int_h^{\infty} k(h) dh, \quad (17)$$

связанная с вертикальной прозрачностью атмосферы на том же уровне соотношением

$$P(h) = e^{-\tau(h)} \quad (18)$$

и с наклонной прозрачностью под углом ζ к зениту соотношением

$$T(\zeta, h) = P(h)^{m(\zeta, h)}, \quad (19)$$

где $m(\zeta, h)$ — так называемая воздушная масса, хорошо описываемая при не слишком больших ζ формулой

$$m = \sec \zeta. \quad (20)$$

Часто вместо τ используют пропорциональную ей вертикальную оптическую плотность атмосферы $D = 0,43 \tau$. Заметим, что соотношения (17) — (19) справедливы только для монохроматического света или при условии неизменности k внутри измеряемого интервала длин волн.

Открытие молекулярного рассеяния света выдвинуло задачу для расчета оптической толщи земной атмосферы, обусловленной этим явлением. В самом деле, согласно формуле Лорентц—Лоренца (см. например,⁵², стр. 42) для газов

$$(n^2 - 1) = 4\pi N \left(\alpha + \frac{P_0^2}{3kT} \right), \quad (21)$$

где α — поляризуемость молекул, P_0 — их постоянный дипольный момент. Обозначая N_0 число Лоренца, ϱ_0 и n_0 — плотность и показатель преломления воздуха при нормальных условиях и учитывая, что состав воздуха остается неизменным по крайней мере до тех высот, где ослабление света за счет рассеяния еще остается ощутимым, находим, что на любой высоте

$$N = N_0 \frac{\varrho}{\varrho_0}, \quad (n^2 - 1) = (n_0^2 - 1) \frac{\varrho}{\varrho_0}. \quad (22)$$

Пользуясь, далее, формулой (15) и учитывая, что давление в точке наблюдения равно $q = g \int_h^{\infty} \varrho dh$, находим согласно (17)

$$\tau(h) = \frac{8\pi^3 (n_0^2 - 1)^2 P}{\lambda^4 N_0 \varrho_0} \frac{4 + 3d}{12 - d}. \quad (23)$$

Соответствующие значения τ в функции длины волны и высоты точки наблюдения по расчетам Пендорфа⁵³ показаны на рис. 4, учитывающем современные данные о среднем высотном ходе атмосферного давления. Из (23) и из отсутствия корреляции между величиной прозрачности и давлением при фиксированной высоте точки наблюдения тотчас следует вывод, что за оптическую изменчивость атмосферы почти целиком ответственен аэрозоль, всегда в той или иной мере присутствующий в воздухе, как мы теперь знаем, на всех высотах, по крайней мере до 80 км (см. ниже).

Однако, если выбирать дни с особо высокой прозрачностью, то можно было ожидать выполнения формулы (23). В первые годы нашего века

наименее определенной величиной в этой формуле было число Лешмидта и поэтому были предприняты попытки определить его из этой формулы (без учета неизвестной тогда поправки на анизотропию молекул — см. § 5). Первые же расчеты как самого Релея, так и Кельвина (1902 г.) показали вполне удовлетворительное по тем временам согласие (по Кельвину $N_0 = 2,47 \cdot 10^{19}$ вместо истинного значения $2,67 \cdot 10^{19}$), что послужило не только первым доказательством справедливости гипотезы Релея о молекулярном рассеянии света, но и веским аргументом в пользу молекулярно-кинетических представлений вообще (см. ⁵⁴). Однако более тщательный анализ данных (в частности, превосходных мно-

голетних наблюдений Смитсоновского института) показал, что атмосферный воздух никогда не бывает свободен от аэрозоля и что необходимо, кроме того, вводить поправки на селективное поглощение газовой фазы. Введение этих поправок позволило существенно улучшить согласие — погрешность снизилась у Кабанна до $\sim 8\%$, у Кью до $\sim 2\%$, у Васи до 1% и недавно у Тороповой до $\sim 0,5\%$. Тем самым было продемонстрировано, что, вычитая из суммарной оптической толщины τ (или коэффициента ослабления k) часть, обусловленную молекулярным рассеянием и селективным поглощением газовой фазы, можно уверенно определять поглощение, за которое ответствен аэрозоль.

Такое выделение аэрозольной составляющей k или τ , выполненное рядом авторов, тотчас выдвинуло на первый план ее изменчивость как по абсолютной величине, так и по спектральной зависимости. Согласно теории Ми для шарообразных частиц*) $k = N\pi a^2 K(q)$, где N — концентрация частиц, a — их радиус, $q = \frac{2\pi a}{\lambda} m$

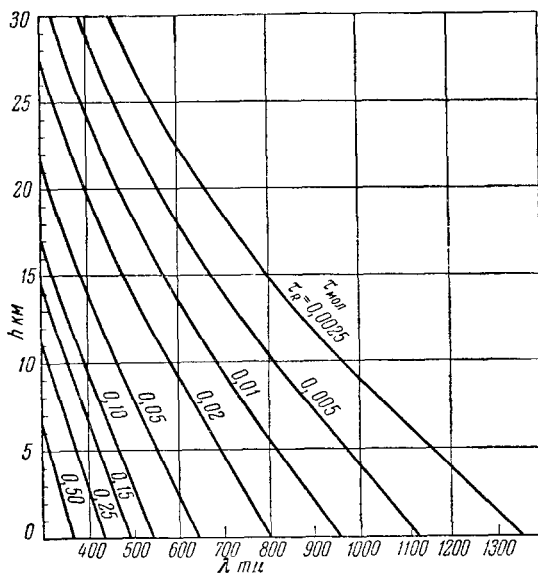


Рис. 4. Линии равных оптических толщин для идеально чистой атмосферы в координатах длина волны—высота.

*) В видимой области спектра кооперативные эффекты (см.³⁹), могущие искажать приведенную формулу для k , несущественны для аэрозоля, а для молекулярного рассеяния играют роль только на высотах около 100 км.

и m — относительный показатель преломления образующего их вещества. В частности, для капель воды (без учета дисперсии) функция $K(\rho)$ имеет вид⁵⁵, показанный на рис. 5. Сразу же видно, что спектральная изменчивость атмосферной прозрачности связана с изменением характера взвешенных в воздухе частиц и, в первую очередь, с изменением их размеров. При этом нередко, как показали измерения Васи⁵⁶, Родионова⁵⁷ и др. (подробнее см.⁵¹), аэрозольное ослабление света имеет резко выраженный селективный характер. В случае полидисперсного аэрозоля, с которым мы обычно сталкиваемся в естественных условиях, селективность ослабления должна быть в большей или меньшей степени сглажена. Если усреднять данные измерений разных авторов или одного и того же

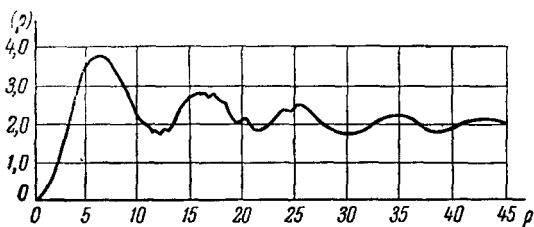


Рис. 5. Функция $K(\rho)$ для капель воды (показатель преломления 1,33).

автора для ряда дней, то получается независимость аэрозольного ослабления света от длины волны. Так как аэрозоль примешан к воздуху, рассеивающему пропорционально λ^{-4} , то его влияние сказывается гораздо сильнее в длинноволновой области спектра, чем в коротковолновой. Поэтому в естественных условиях спектральная

зависимость k или τ выражена слабее, чем это следует из закона Релея (небо имеет белесый цвет), и грубо приближенно иногда может быть выражена в виде $k \sim \lambda^{-n}$, где n варьируется от 0 до 2—3.

В безоблачные дни по мере увеличения высоты, как правило, уменьшается и коэффициент ослабления атмосферного воздуха. На малых высотах (до 0,5—1 км) это убывание происходит очень быстро, главным образом за счет уменьшения концентрации пыли или водяных капель, поднимаемых с подстилающей поверхности местными воздушными потоками. Затем это убывание резко замедляется, а иногда даже сменяется слабым возрастанием вплоть до высоты 3—5 км, т. е. примерно до верхней границы конвективного слоя. Далее k убывает с высотой, в среднем, примерно по барометрической формуле с частыми и очень изменчивыми нарушениями за счет аэрозольных (облачных) слоев. В качестве примера приводим данные, полученные Фарапоновой при измерениях с самолета⁵⁸ (рис. 6). При измерениях на склонах гор высотная зависимость, в среднем, оказывается более плавной, чем в свободной атмосфере, без горба в области 3—5 км (рис. 7), что можно объяснить влиянием подстилающей поверхности и горно-долинной циркуляции⁵¹. Остается добавить, что в отсутствие явно выраженных облачных слоев относительная концентрация аэрозоля выше 3—5 км мало меняется с высотой и что в особо ясные дни на долю аэрозоля приходится 30—50% общего ослабления света атмосферой, чем и объясняется успех первых же определений числа Лешмидта.

Аэрозоль, включающий в себя жидко-капельную фазу воды, принадлежит к наиболее изменчивым компонентам атмосферы как в количественном, так и в качественном отношении. Многочисленные измерения как прозрачности, так и яркости и поляризации дневного неба (см. § 5 и 6) свидетельствуют о том, что аэрозоль распределяется в атмосфере не однородными слоями, а в виде отдельных клочковатых скоплений, переносимых ветром и претерпевающих постоянные качественные изменения, в том числе в результате конденсационных процессов. Поэтому представление о горизонтально однородной атмосфере не соответствует действительности

даже в самые ясные и спокойные дни, что находит свое яркое выражение, в частности, в отмеченной уже изменчивости прозрачности во времени, в зависимости от направления (азимута) наблюдения, и от перемещения вдоль земной поверхности⁵¹. Весьма характерно отсутствие корреляции между изменчивостью прозрачности в разных участках спектра, что свидетельствует не только о количественной, но и о качественной изменчивости аэрозоля. Сказанное иллюстрируется рис. 8⁵¹. Не менее характерно отсутствие, вопреки распространенной точке зрения, корреляции между горизонтальной и вертикальной прозрачностью атмосферы⁵¹.

Если теперь обратиться к случаям сильной замутненности воздуха — облакам, туманам, осадкам и т. п., то данные наблюдений образуют еще более пеструю картину, что находит свое естественное объяснение в крайнем разнообразии микроструктуры этих образований. В общем, сейчас нет никаких сомнений, что все наблюдаемые здесь эффекты лежат в рамках, предписываемых теорией Ми (см, например,^{40, 50, 59-61}). Однако вследствие

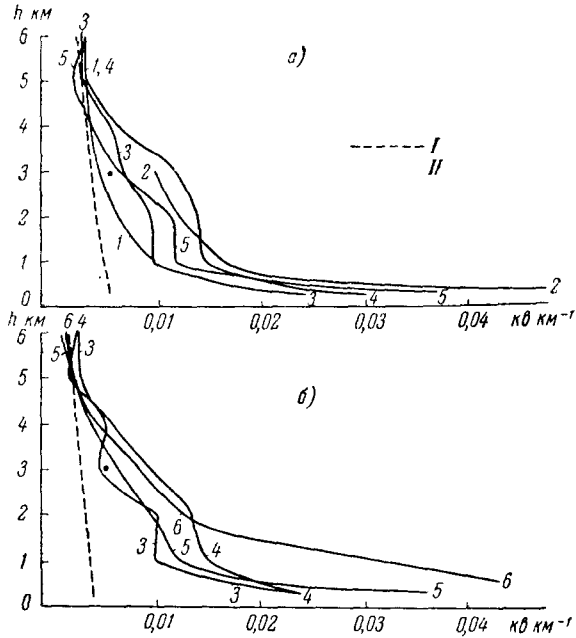


Рис. 6. Средние значения коэффициента ослабления k на различных высотах.

1—Московск. обл. (1956—57 гг.), 2—Сев. Казахстан (1956 г.), 3—Харьк. обл. (1957 г.), 4—Сев. Кавказ (1957 г.), 5—Московск. обл. (1958 г.), 6—Зап. Германия (1944 г.), I—абсолютно чистая атмосфера, II—на склонах Эльбруса (1957 г.).

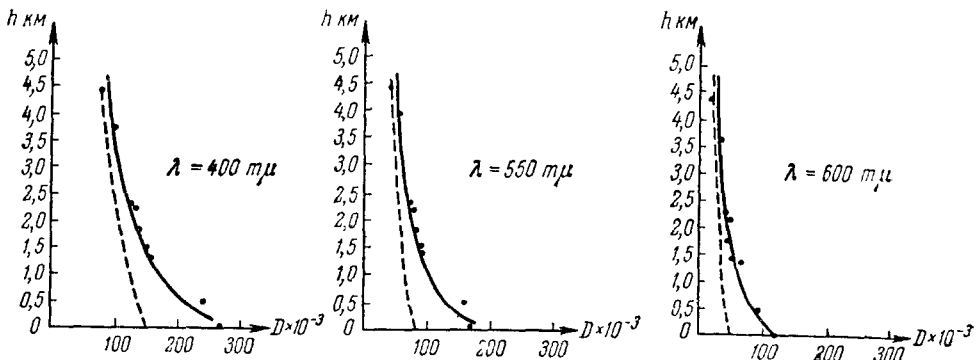


Рис. 7. Зависимость средней вертикальной оптической плотности атмосферы от высоты над уровнем моря по измерениям различных авторов на склонах гор. Пунктирная линия — обеспыленная атмосфера.

характерной полидисперсности водного аэрозоля и разнообразия его распределений по размерам, наблюдаемые явления с трудом поддаются количественному анализу. При этом наибольшую роль здесь играют

препятствия двоякого рода. Во-первых, расчеты коэффициентов ослабления по теории Ми далеко не охватывают всех случаев, с которыми приходится встречаться даже применительно к водяным каплям. В частности, почти отсутствуют данные, относящиеся к полосам поглощения воды, когда заведомо имеют место весьма ощутимые и своеобразные аномалии⁶². Во-вторых, мы не располагаем пока сколько-нибудь надежными данными о субмикроскопической фракции водяных капель, наиболее активной в оптическом отношении. Кроме того, измерения в условиях очень высокой мутности осложняются трудно устранимыми эффектами многократного рассеяния света. Поэтому многочисленные усилия, направленные

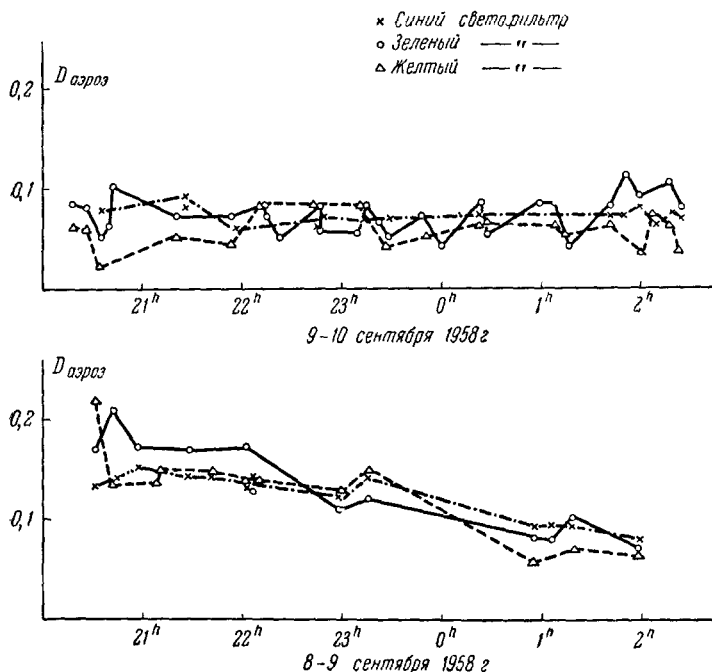


Рис. 8. Примеры колебаний аэрозольной компоненты вертикальной оптической плотности атмосферы в различных участках спектра.

на использование данных о прозрачности для определения микроструктуры облаков и туманов или вообще атмосферного аэрозоля, пока не принесли ожидаемых результатов, хотя и создали уверенность в осуществимости этой задачи.

Таковы, в общих чертах, итоги двухвековых исследований прозрачности атмосферы в видимой области спектра (подробнее см.^{40, 50, 51}). Посмотрим теперь, что можно извлечь из данных о свечении дневного неба.

§ 5. ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ КАРТА НЕБА, АНИЗОТРОПИЯ МОЛЕКУЛ И МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ

Наблюдение Араго не только способствовало открытию рассеяния света и имело непреходящее значение само по себе. Одновременно оно выдвинуло вопросы, разрешение которых потребовало всей мощи физики XX в. и непосредственно стимулировало развитие двух важных ее раз-

делов — молекулярной оптики и теории переноса излучения в мутных средах.

Обнаружив поляризацию света, поступающего от небесного свода, Араго тотчас же приступил к составлению поляризационной карты неба и выявил почти все ее характерные особенности. Им было установлено, что максимальная поляризация наблюдается под углом около 90° к направлению солнечных лучей и что (выражаясь современным нам языком) плоскость поляризации совпадает с плоскостью рассеяния («положительная» поляризация). Далее им была обнаружена (в окрестности антисолярной точки) область, где плоскость поляризации перпендикулярна плоскости рассеяния («отрицательная» поляризация), причем на границе этих двух областей в вертикале Солнца располагается «нейтральная точка», откуда поступает полностью деполяризованный свет. Аналогичная картина, как установил Араго и через 80 лет подтвердили Корню и Пильчиков, наблюдается и ночью при лунном свете. Величина максимальной поляризации и положение нейтральной точки, по наблюдениям Араго,

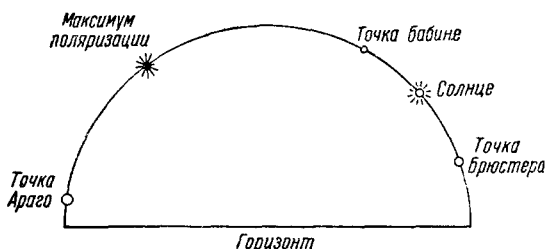


Рис. 9. Положение нейтральных точек и максимума поляризации в вертикале Солнца.

сильно зависят от состояния атмосферы, причем иногда нейтральная точка смещается в сторону с вертикала Солнца. В 1840 г. Бабиня дополнил эту картину еще одной нейтральной точкой, расположенной недалеко от Солнца, а позднее Брюстер обнаружил третью нейтральную точку, располагающуюся под Солнцем (рис. 9).

Последующие наблюдения, усердно продолжающиеся до наших дней, лишь подтвердили и несколько уточнили эту качественно верную картину, но не внесли в нее почти ничего существенно нового, хотя среди исследователей мы встречаем (помимо названных) такие имена, как Беккерель, Вебер, Вильд, Иенсен, Дорно, Зюринг, Пертнер, Тихановский и многие другие. Пожалуй, единственными имеющими принципиальное значение открытия были: 1) наблюдение Пильчиковым⁶³ (1892 г.) совершенно противоестественной с точки зрения теории Релея зависимости степени поляризации от длины волны («дисперсия поляризации» по терминологии Ширман), подтвержденное затем наблюдениями Тихановского и Пертнера, а также 2) обнаружение Соре, Дорно, Мак-Коннелом и др. влияния на поляризацию альбедо земной поверхности. Следует отметить также наблюдение Рубенсона⁶⁸ (1864 г.), подтвержденное позднее Вильдом и Иенсеном, что в зависимости от погоды положение максимума поляризации может несколько смещаться вдоль вертикала Солнца как в сторону меньших, так и в сторону больших углов. На рис. 10 для иллюстрации приводятся типичные зависимости степени поляризации от угла рассеяния вдоль вертикала Солнца по данным Розенберга и Туриковой, а на рис. 11 — полученная теми же авторами зависимость степени поляризации в максимуме от вертикальной прозрачности атмосферы⁵¹. Последний рисунок показывает, что, несмотря на заметные индивидуальные отступления,

существует хорошо выраженная корреляционная связь, согласно которой степень поляризации в максимуме равна вертикальной прозрачности атмосферы независимо от высоты Солнца, что хорошо согласуется с наблюдениями как самого Араго, так и всех последующих исследователей

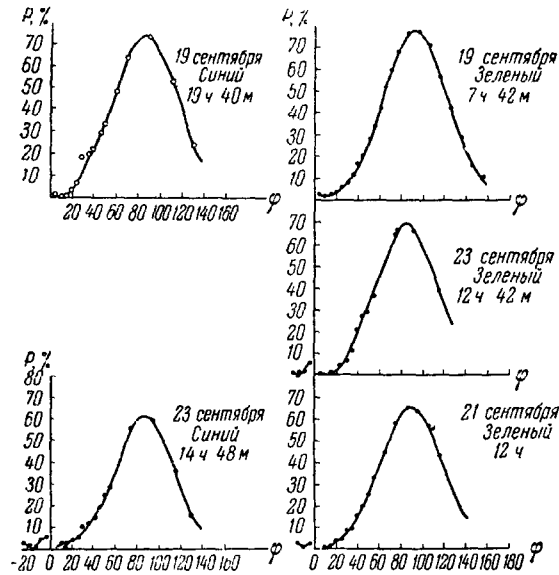


Рис. 10. Примеры зависимости степени поляризации свечения дневного неба от угла рассеяния в различные дни.

неба. Мы не имеем возможности останавливаться на дальнейших подробностях и отсылаем за ними к превосходным обзорам Иенсена⁶⁴ и Дорно^{65, 66}, тем более, что с тех пор в этой области мало что изменилось. Обозревая

наблюдательный материал, остается добавить, что в основной массе он получен опять-таки в поисках эмпирических связей с погодой и, несмотря на свою необъятность, не представляет интереса для последующего анализа. В качестве яркого примера мы позволим себе привести исследования Роггенкампа⁶⁷, производшего за свою жизнь более 15 тысяч сеансов измерений положения нейтральных точек в сумеречные часы (т. е. 15 тыс. сумерек!) и добросовестно выведшего из них... арифметические средние.

Выше мы видели, что опыты Гови и Тиндала с рассеянием света в коллоидах обнаружили практически все особенности, отмеченные Араго в поляризации свечения дневного неба, и что именно эти особен-

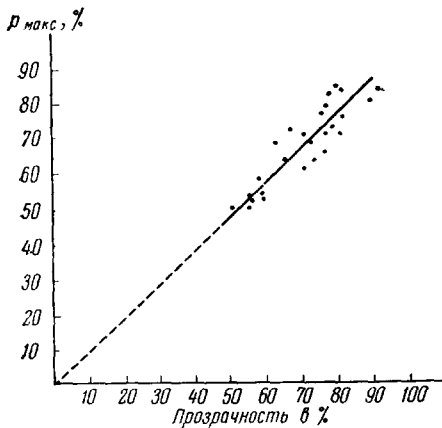


Рис. 11. Корреляция между максимальной поляризацией света дневного неба и вертикальной прозрачностью атмосферы.

ности укрепили в свое время убеждение в идентичности обоих явлений. При этом Рубэнсон еще в 1864 г. прямо указывал⁶⁸, что причину всех

вариаций поляризации свечения дневного неба следует видеть в загрязнении воздуха дымом и водяными каплями. Однако с появлением теории Релея, столь хорошо объяснившей общий характер картины и решительно оттеснившей все прочие точки зрения на второй план, эти особенности стали рассматриваться как удивительные аномалии, требующие своего объяснения именно с точки зрения молекулярного рассеяния.

Пионером в этих исканиях выступил один из наиболее активных исследователей поляризации свечения дневного неба Соре⁶⁹, выдвинувший в 1888 г. совершенно новую для своего времени идею о возможности многократного рассеяния света (по аналогии с предложенной Мюллером²² идеей его многократного отражения) и попытавшийся привлечь ее к объяснению существования нейтральных точек. В сущности, это была первая работа в области переноса излучения в рассеивающей среде, оказавшая, несмотря на крайнюю грубость расчетной схемы, серьезное влияние на последующую постановку всей проблемы в целом. Вскоре Хвольсоном, а затем Шварцшильдом и Шустером были сформулированы первые уравнения переноса излучения, положившие начало развитию этой отрасли знания уже в рамках математической физики. Однако в первоначальной формулировке это были только уравнения переноса энергии, не учитывавшие поляризационных эффектов и непригодные к решению задачи Соре. Поэтому для ее решения приходилось вновь привлекать кустарные (хотя и более надежные, чем у самого Соре) методы. Это было выполнено в 1914 г. Альгримом⁷⁰ и в 1927 г. Тихановским⁷¹, которые путем длительных и сложных расчетов показали, что идея Соре верна и что действительно вторичное рассеяние света в атмосфере ведет к появлению на небе нейтральных точек и к некоторому, зависящему от τ уменьшению степени поляризации в максимуме. При этом находит себе объяснение и открывая Пильчиковым дисперсия поляризации.

Тем временем произошло событие, направившее мысли исследователей по иному пути. В 1917—1918 гг. М. Борн выдвинул идею об анизотропии молекул⁷². Одновременно Стретт (Релей) младший обнаружил⁷³, что при рассеянии света в парах и газах поляризация при наблюдении под углом рассеяния $\varphi = 90^\circ$ никогда не бывает полной. Последнее явление особенно привлекло внимание в связи с картиной поляризации небосвода, и уже в 1921 г. Кабанн⁷⁴ объяснил его, исходя из идеи Борна, и усовершенствовал теорию Релея, введя в нее учет анизотропии — ср. формулы (14) и (15) (см. также^{52, 59, 75}). Однако поправка Кабанна не решила вопроса. Для чистого воздуха она привела к значению степени поляризации при $\varphi = 90^\circ$, равному 92% вместо известной из данных Тихановского максимально наблюдаемой в атмосфере величины 84,5% (см. рис. 14). Даже учет вторичного рассеяния с поправкой Кабанна, выполненный в 1927 г. Тихановским, не выправил положения. Тем более оставалось непонятным влияние, которое оказывала погода не только на величину поляризации, но и на положение нейтральных точек. Это побудило Марию Ширман и Мильха⁷⁶ вернуться к гипотезе Рубенсона⁶⁸ о том, что причину поляризационных особенностей следует искать в рассеянии света крупными частицами, в соответствии с уже достаточно развитой к этому времени теорией Ми. Впрочем, эта попытка осталась в рамках абстрактной дискуссии, ибо конкретных расчетов поляризации рассеянного такими частицами света очень мало даже сейчас, а в двадцатых годах их почти совсем не было.

Следующий шаг смог быть сделан только после того, как в 1946 г. независимо Чандрасекаром⁴⁵ и Розенбергом⁴⁴ было сформулировано уравнение переноса излучения, учитывающее поляризацию последнего (см. ^{21, 38}). Обоиими авторами, так же как и В. В. Соболевым⁴⁶, это

матричное уравнение, получившее ныне столь широкое применение в атомной физике, было сформулировано именно в связи с задачей о поляризации света, поступающего от небесного свода. Его формулирование оказалось возможным только благодаря использованию вектор-параметра Стокса и матрицы рассеяния и сразу же позволило значительно расширить круг доступных для разрешения задач. В частности, было отчетливо установлено, что поляризационные эффекты оказывают существенное влияние не только на поляризацию, но и на интенсивность многократно рассеянного света, даже в глубине рассеивающей среды¹⁹. Попутно выяснилось, что расчеты Соре, Альгрима и Тихановского содержали методические ошибки. Однако качественный расчет по грубой схеме Соре, выполненный Розенбергом⁷⁷, показал, что эти ошибки не изменяют общей картины и что нейтральные точки и их расположение на небе находят себе объяснение во вторичном рассеянии. Наконец, в 1954 г. Чандрасекар и Эльберт⁷⁸ опубликовали подробные таблицы яркости и поляризации

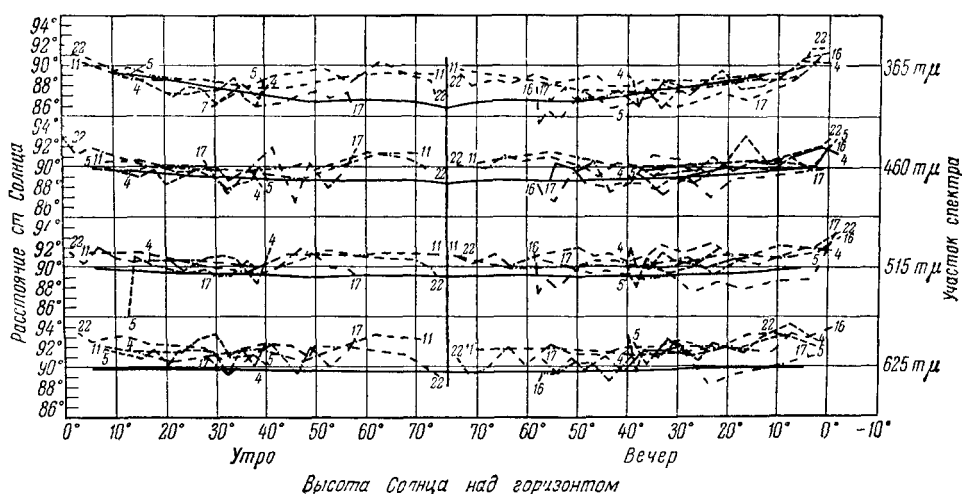


Рис. 12. Реал и наблюдаемые перемещения положения максимума поляризации в различных участках спектра по наблюдениям в различных пунктах и в разные дни. Сплошные линии — теоретические ожидания при релеевском рассеянии и альбедо земной поверхности 0,25.

дневного неба при различных высотах солнца в предположении чисто молекулярного рассеяния. Эти таблицы, явившиеся результатом тщательного решения строгого уравнения переноса при различных предположениях об альбедо земной поверхности, исчерпывали, по существу, проблему обеспыленной атмосферы.

Вскоре Секера⁷⁹ провел тщательные исследования поляризации дневного неба при помощи саморегистрирующего поляриметра и установил, что, в среднем, картина, нарисованная Чандрасекаром и Эльберт, не плохо соответствует действительности, но что согласие опять-таки носит только полукочественный характер. Вместе с тем отчетливо выявляются как систематические отклонения от этой картины, так и беспорядочные вариации, в том числе и короткопериодные. Примером могут служить блуждания максимума поляризации для разных участков спектра, показанные на рис. 12. Недавно Липский⁸⁰, измеряя поляризацию света дневного неба с очень высоким угловым и спектральным разрешением, также обнаружил быстрые и глубокие колебания степени поляризации, не коррелированные для различных длин волн. Это не оставляет сомнений в справедливости высказанной еще Рубенсоном, а затем Шир-

ман точки зрения, что за все вариации поляризации свечения небесного свода ответственен атмосферный аэрозоль, что этот аэрозоль весьма переменчив как количественно, так и качественно, и что его роль в рассеянии света атмосферой отнюдь не мала. Поскольку не малы и эффекты вторичного рассеяния, постольку, как подчеркивает Секера⁷⁷, разделение эффектов молекулярного и аэрозольного рассеяния в свечении дневного неба невозможно из-за наличия нелинейных эффектов, непренебрежимых даже при высоких прозрачностях. Тем самым, из данных о свечении дневного неба заведомо нельзя извлечь сколько-нибудь надежной информации о рассеивающих свойствах воздуха, во всяком случае, поскольку речь идет о таком тонком эффекте, как поляризация, т. е. о компонентах $f_{21}(\varphi)$ и $f_{31}(\varphi)$ матрицы рассеяния — см. § 3. Таков несколько неожиданный итог весьма интенсивных полуторавековых исследований, оказавших, как мы видели, существенное влияние на развитие оптики и способствовавших целому ряду важнейших открытий.

§ 6. ЯРКОСТНАЯ КАРТА НЕБА И ФУНКЦИЯ РАССЕЯНИЯ

Систематические измерения яркости дневного безоблачного неба были начаты в 1898 г. Иенсеном⁶⁴ и продолжают до наших дней многими авторами. Особенно обширные многолетние наблюдения выполнены Дорно⁶⁵ и в последние годы Пясковской-Фесенковой⁸¹. В результате этого накоплена весьма богатая коллекция яркостных карт неба в разных метеорологических и географических условиях. Однако первые же сопоставления этих карт с теорией Релея привели к поразительному результату. Если

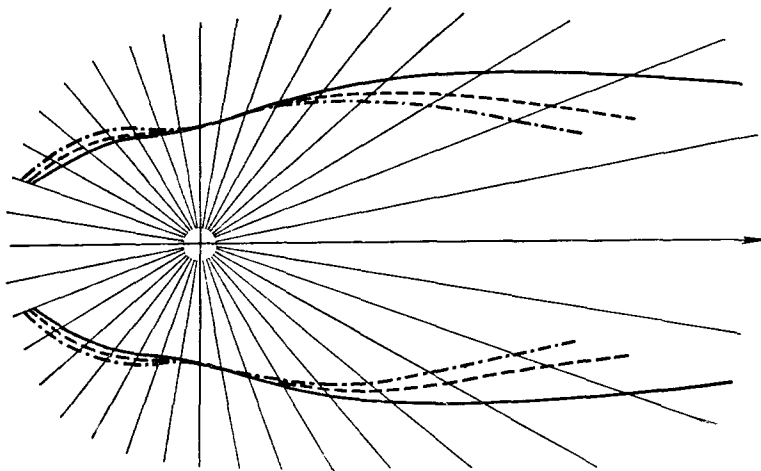


Рис. 13. Примеры атмосферных индикатрис рассеяния, найденных из измерений яркости дневного неба.

поляризация и окраска неба примерно соответствовали теоретическим ожиданиям, то угловое распределение яркости не имело с ними ничего общего. Тогда возникла идея воспользоваться этими данными для экспериментального определения функции рассеяния $f_{11}(\varphi)$ атмосферного воздуха, тем более, что иных путей для этого в те времена не было видно. В грубых чертах (подробнее см. ⁸¹) идея состояла в том, что если измерять яркость неба в различных азимутах, но всегда вдоль альмукантарата Солнца (т. е. в точках, возвышающихся над горизонтом на тот же угол, что и Солнце), то ослабление солнечных лучей на их пути до рассеивающего объема и далее до глаза наблюдателя будет одним и тем же и различие

в яркости будет обусловлено только угловой зависимостью компоненты $f_{11}(\varphi)$ матрицы рассеяния. При этом, конечно, предполагается, что вторичное рассеяние не слишком сильно искажает картину и что атмосфера однородна в горизонтальном направлении.

Кроме того, так как свойства атмосферы меняются с высотой, получаемые данные о виде функции рассеяния $f_{11}(\varphi)$ будут некоторыми взвешенными средними по высотам⁸². Подробный анализ получаемых таким способом данных содержится в⁸¹(см. также⁵¹), и мы ограничимся только

некоторым количеством основных сведений.

Прежде всего оказалось, что индикатрисы (функции) рассеяния чрезвычайно сильно вытянуты вперед и завершаются характерным для теории Ми дифракционным «носом», ответственным за околосолнечный ореол. Примеры наблюдаемых индикатрис⁸¹ показаны на рис. 13. Далее оказалось, что форма индикатрисы очень чувствительна к изменениям атмосферных условий, но только в области малых и больших углов рассеяния, особенно в области ореола, тогда как в области средних углов рассеяния эта чувствительность много меньше. Наконец, было обнаружено⁸¹, что вытянутость индикатрис возрастает с увеличением длины

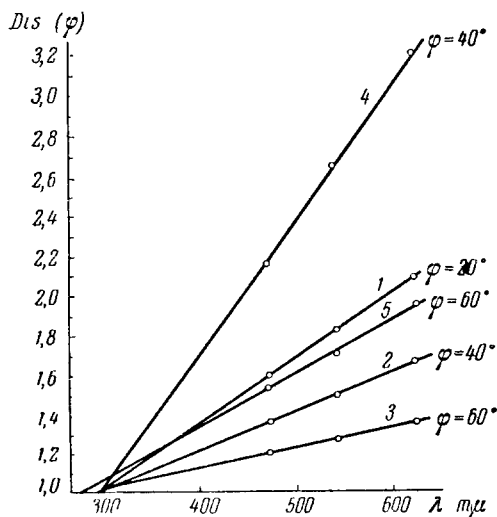


Рис. 14. Увеличение диссимметрии индикатрис рассеяния с увеличением длины волны: 1, 2 и 3 — для атмосферного воздуха; 4 и 5 — для аэрозольной компоненты.

волны, что иллюстрируется рис. 14⁸¹, по оси ординат в котором отложена так называемая диссимметрия функции рассеяния

$$Dis(\varphi) = \frac{f_{11}(\varphi)}{f_{11}(\pi - \varphi)}.$$

Как объяснил Кастров⁸³, это является результатом уменьшения относительной роли молекулярного рассеяния (или рассеяния на субмикроскопической фракции) по мере увеличения длины волны и уменьшения угла рассеяния.

Таким образом, яркостная карта неба недвусмысленно свидетельствует о том, что рассеяние в атмосфере носит существенно аэрозольный характер. Весьма неожиданным было узнать, что этот характер рассеяния сохраняется и до очень больших высот, как это следует из рис. 15, полученного путем измерения яркости неба при помощи автостратостата⁸⁴.

Методика теоретического расчета яркости небосвода в различных условиях на основе решения уравнения переноса излучения в рассеивающей среде впервые была разработана Кузнецовым⁸⁵, а затем Чандрасекаром и Соболевым²¹, к сожалению, без учета поляризационных эффектов. Опираясь на эту методику, ряд авторов произвел численные расчеты яркостной карты неба при различных предположениях о виде индикатрисы и высотном ходе коэффициента рассеяния, в результате которых мы располагаем теперь набором подробных таблиц, охватывающих широкий диапазон возможных вариаций этих величин⁸⁶.

Анализ этих таблиц позволяет, в частности, оценить, насколько эффекты вторичного рассеяния, а также отражения от земной поверхности могут исказить вид функций рассеяния, извлекаемых из данных о яркости дневного неба. Оказывается⁸², что искажения эти весьма заметны, коль скоро прозрачность всей толщи атмосферы становится ниже, примерно

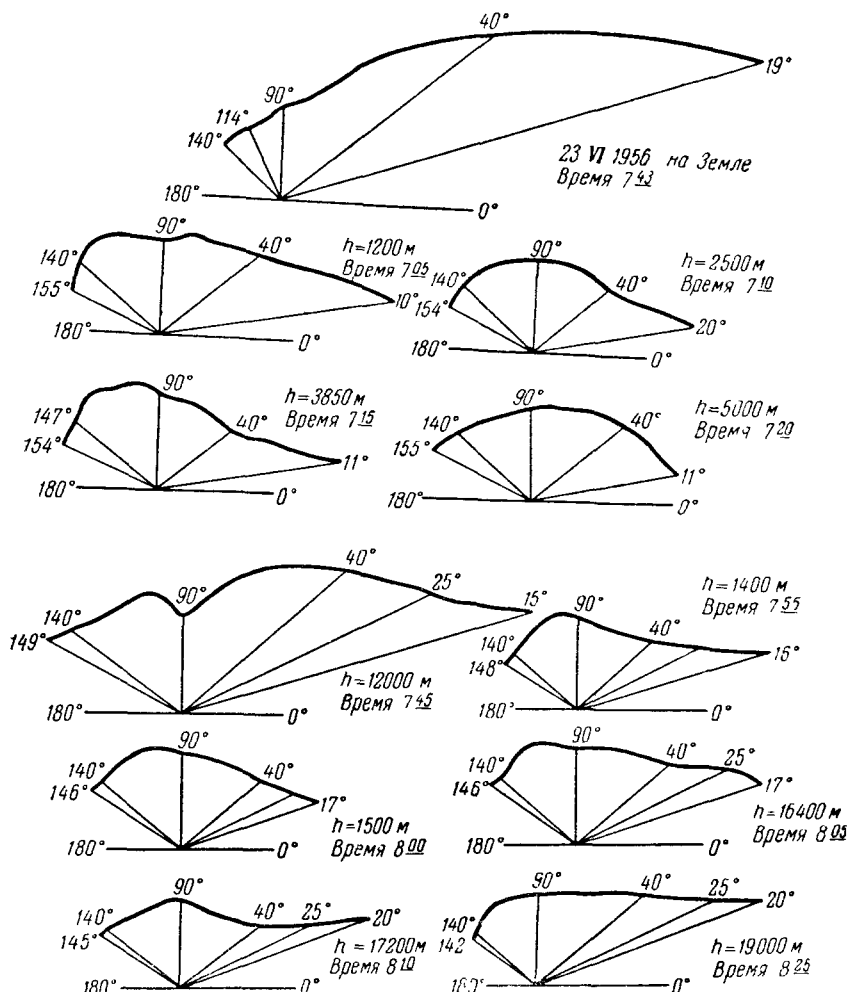


Рис. 15. Индикаторы рассеяния атмосферного воздуха, измеренные по яркости дневного неба на различных высотах.

85%, т. е. практически почти всегда, и не уменьшаются при поднятии наблюдателя ввысь. Поэтому и в отношении $f_{11}(\varphi)$ из анализа света дневного неба невозможно извлечь ничего, кроме качественных и сугубо ориентировочных суждений. Исключение составляют наименее характерные для атмосферы случаи необычайно высокой прозрачности. Впрочем, знание яркостной и поляризационной карт неба и их вариаций имеет немаловажное самостоятельное значение, как познавательное, так и прикладное, независимо от задачи определения вида матрицы рассеяния атмосферного воздуха. Вспомним, например, что поляризация света дневного неба может быть использована для целей ориентации в пространстве

(пчелы, как известно, ориентируются именно таким образом) и что его яркостной картой определяется освещенность наших жилищ.

Итак, мы убеждаемся, что все интегральные методы, основанные на исследовании свечения дневного неба, не оправдывают возлагавшихся на них надежд и не в состоянии снабдить нас достоверными сведениями о виде матрицы рассеяния (добавим еще, и потому, что сама эта матрица подвержена существенным и совершенно случайным изменениям с высотой и во времени). Поэтому единственно надежным методом изучения характера матрицы рассеяния и ее вариаций является метод локального изучения акта рассеяния при помощи направленного светового пучка. Однако возможность выполнения подобных измерений, требующих использования весьма совершенных осветительных и наблюдательных средств,

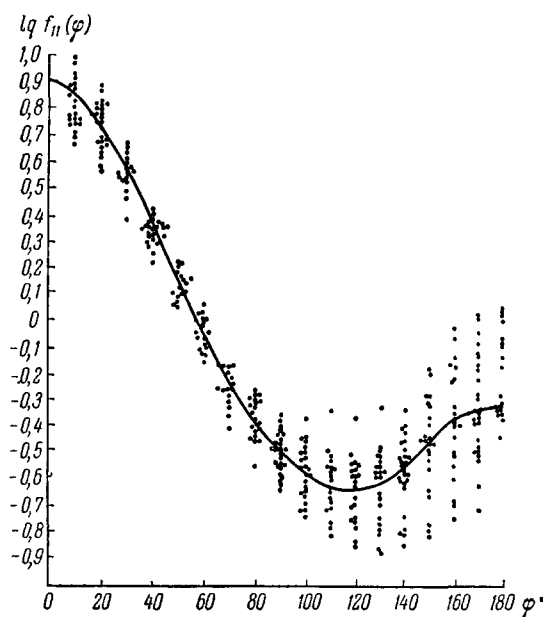


Рис. 16. Функции рассеяния атмосферного воздуха над поверхностью моря (в логарифмическом масштабе) по измерениям в течение ряда ночей.

и Стайлсом⁸⁷. Длительные измерения Бартеневой⁸⁸ показали (в согласии с другими авторами), что степень вытянутости индикатрисы хорошо коррелирует с величиной коэффициента рассеяния, увеличиваясь одновременно с ним, причем отчетливо обнаруживается отсутствие каких-либо географических зависимостей, кроме частоты повторения тех или иных условий прозрачности. Кроме того обнаруживается, что все индикатрисы пересекаются в сравнительно узком интервале углов рассеяния около $\varphi = 45^\circ$, так что коэффициент направленного светорассеяния $D_{11}(45^\circ)$ может с хорошей точностью рассматриваться как мера прозрачности воздуха. (По данным Пясковской-Фесенковой⁸¹, пересечение всех индикатрис имеет место при $\varphi = 60^\circ$, что можно объяснить, в частности, их искажением за счет вторичного рассеяния).

Какие-либо дальнейшие суждения о виде функции рассеяния для атмосферного воздуха пока невозможны, ибо все измерения велись без сопровождающего контроля природы и микроструктуры аэрозольной компоненты.

появилась только в недавнее время, причем измерения ограничиваются пока исключительно угловой зависимостью компоненты $f_{11}(\varphi)$, почти не затрагивая ни ее спектрального хода, ни остальных компонент матрицы рассеяния.

Как и следовало ожидать, между пока еще немногочисленными данными разных авторов существует только качественное и весьма неуверенное согласие. У земной поверхности (а сейчас нет никаких оснований ожидать — см. § 7, — что положение будет иным, по крайней мере, до высот порядка 80—90 км) индикатрисы рассеяния имеют типичный аэрозольный характер с резкой вытянутостью вперед и более или менее ярко выраженной ореольной частью. На рис. 16 приведены, в качестве примера, индикатрисы, измеренные над поверхностью моря Честерманом

Прочие компоненты матрицы рассеяния пока вообще не измерялись. Исключение составляют носящие еще предварительный характер опыты, выполненные недавно Розенбергом и Рудометкиной⁵¹. Общее представление о характере поляризационных эффектов, имеющих место при рассеянии света в атмосферном воздухе, можно получить из рис. 17, на котором смонтирован набор фотографий одного и того же участка линейно

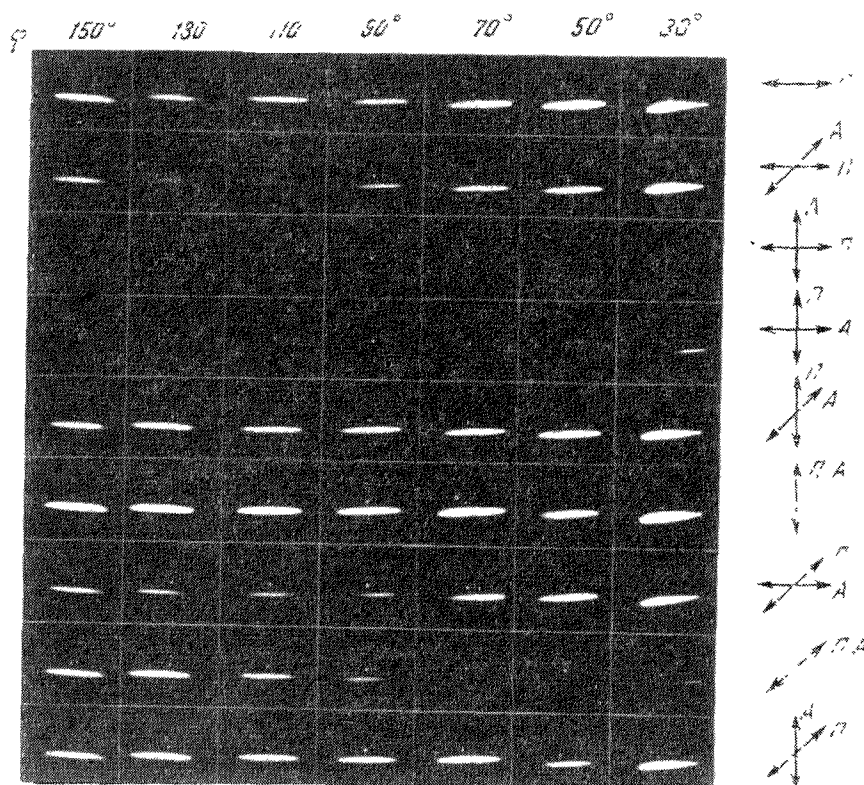


Рис. 17. Мозаические изображения угловой зависимости яркости горизонтального прожекторного пучка в одну из ночей при различных состояниях его поляризации Π и наблюдении через различным образом ориентированные анализаторы (A).

Каждое изображение охватывает интервал углов $\pm 15^\circ$ относительно указанных сверху значений φ и по краям искажено виньетированием.

поляризованного прожекторного пучка, выполненных в одну из ночей при помощи фотокамер, оснащенных поляроидами и сверхфильтрами ($\lambda_{\text{эф}} = 420 \pm 20 \text{ мкм}$) и направленных под различными углами φ к лучу (угол зрения камер $\pm 15^\circ$, причем концы изображений луча искажены эффектом виньетирования). Стрелки справа указывают направление (относительно вертикали) вектора электрического поля волны в прожекторном пучке (Π) и пропускаемой анализатором на фотографической камере (A).

Кроме того, Розенбергом и Михайлиным⁸⁹ экспериментально установлено, что при известных условиях (соответствующих следствиям из теории Ми) свет, рассеянный атмосферой (т. е. вкрапленными в нее частицами аэрозоля), эллиптически поляризован, причем степень

эллиптичности $q = \frac{f_{43}}{f_{11}}$ — ср. (16) — отнюдь не мала, особенно в области радуги (рис. 18). При этом оказалось, что компоненты матрицы f_{41} и f_{42} если не равны нулю, то, во всяком случае, очень малы. Более детальное исследование матрицы рассеяния и ее угловой и спектральной зависимостей — дело будущего.

Особняком стоит вопрос об исследовании ореола. Из теории Ми следует, что ореол появляется только при наличии достаточно крупных частиц и имеет дифракционную природу, что позволяет описывать его сравнительно простой и общей формулой. В случае полидисперсного аэрозоля угловая структура ореола получается в результате простого взаимного

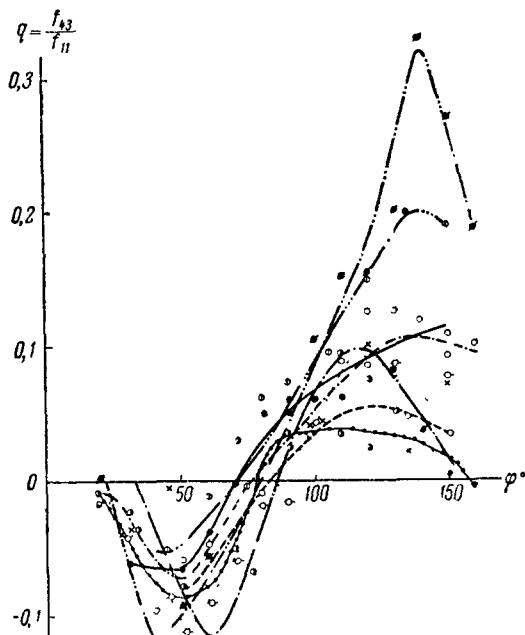


Рис. 18. Угловые зависимости степени эллиптичности света, рассеянного в приземном слое атмосферы, по измерениям для ряда последовательных ночей.

наложения ореолов от всех частиц. Как показали Слепцевич, а затем Шифрин⁹⁰, это дает возможность сравнительно простыми средствами рассчитать, зная угловую структуру ореола, распределение по размерам крупнокапельной (более нескольких микрон) фракции аэрозоля, ответственной за образование ореола. Вряд ли можно сомневаться в будущем этого метода, все больше привлекающего к себе внимание.

Наконец, к рассматриваемому нами вопросу о виде матрицы рассеяния непосредственно относится и обширный круг разнообразных явлений, обязанных своим происхождением отражению, преломлению и дифракции света на капельках воды и ледяных кристаллах, — всевозможные радуги, гало, венцы и глюрии. Долгое время они были главным предметом внимания атмосферной оптики, их подробным описаниям посвя-

щены многие томы (см., например, ^{1,2,91}). Несмотря на то, что в течение тысячелетий в их наблюдении принимало участие неисчислимое количество исследователей, зачастую весьма опытных и именитых, для большинства из них имеется, помимо общего описания характерных черт и подробной классификации, только качественное объяснение обуславливающих их причин. Строгая теория ограничивается лишь теми явлениями, которые вытекают из теории Ми, и преимущественно (за исключением радуг) касается только принципиальных сторон явления, минуя его детали. Что же касается явлений, порождаемых ледяными кристаллами, то тут теория полностью отсутствует. Экспериментальные данные в этой области также крайне скудны и не поддаются систематизации, главным образом, за отсутствием сведений о реальных состояниях рассеивающей среды, к которым они относятся. Впрочем, с такой ситуацией мы встречаемся во всей области коллоидной оптики и именно она служит причиной того, например, что теория Ми вот уже полвека остается, фактически, не опробованной с количественной стороны.

§ 7. ОПТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПРОБЛЕМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

Идея оптического зондирования атмосферы очень проста. Если нам известно, как связаны законы рассеяния со свойствами рассеивающей среды, то мы можем судить о состоянии последней (в данном случае атмосферного воздуха) по характеру рассеянного ею света. Выше мы видели, что вследствие оптической неоднородности атмосферы и помех, создаваемых многократным рассеянием, использование интегральных эффектов (таких, как свечение дневного неба или прозрачность всей толщи атмосферы) не может принести надежных количественных сведений об оптическом состоянии атмосферы на различных высотах в данный момент времени. Добавим, что решающим препятствием к этому служит сложность теории распространения света в рассеивающей среде, не позволяющая провести в общем виде решение обратной задачи, т. е. задачи определения по световому полю свойств среды, включая угловую зависимость всех компонент матрицы рассеяния³⁹. Поэтому исследование оптических свойств атмосферы непременно должно носить сугубо локальный характер, при котором уверенно измеряются эффекты лишь однократного рассеяния в достаточно четко ограниченном и сравнительно небольшом объеме. Очевидно, это может быть достигнуто, если атмосфера освещается резко ограниченным направленным световым пучком, прослеживание и перемещение которого позволяет зондировать различные области атмосферы.

Впервые эта идея была высказана Альгазеном³. Он обратил внимание на то, что в течение сумерек земная тень поднимается все выше и выше и что ночь наступает тогда, когда вся атмосфера оказывается в тени. Это позволило Альгазену, измеряя длительность сумерек, оценить высоту атмосферы в 52 тыс. шагов (позднее эти вычисления были улучшены Кеплером⁴), что для XI в. было очень высокой точностью.

В дальнейшем проблема сумерек, захватывающих, кстати сказать, на экваторе около 10%, а на полюсе без малого 30% длительности года, привлекала к себе внимание И. и Н. Бернулли, Мопертюи, Даламбера, Клаузиуса и многих других, постоянно оставаясь в поле зрения как наблюдателей, так и теоретиков. Современное объяснение сумеречных явлений как обусловленных рассеянием и ослаблением света Солнца земной атмосферой было впервые высказано Бецольдом⁹² в 1863 г., т. е. тотчас после открытия Гови, причем не малую роль сыграла опять-таки необходимость объяснить характер поляризации света сумеречного неба.

Последующее развитие теории сумерек шло по линии объяснения, главным образом, красок зари. И только в 1923 г. Фесенков, впервые после Альгазена и Кеплера, вновь поставил обратную проблему использования сумеречных явлений для оптического зондирования высоких слоев атмосферы⁹³. Тщательный анализ влияния различных факторов на яркость сумеречного неба позволил Фесенкову в 1930 г. выдвинуть⁹⁴ весьма плодотворную идею «сумеречного луча», детально развитую затем Штауде и в несколько иной форме Линком. Суть этой идеи, кратко, состоит в том, что в каждый данный момент сумерек свет поступает от сравнительно тонкого эффективного слоя атмосферы, ограниченного сверху вследствие быстрого убывания плотности воздуха с высотой и снизу вследствие быстрого возрастания (при приближении к земле) ослабления освещающих лучей Солнца нижними слоями атмосферы. По мере течения сумерек этот эффективный слой постепенно поднимается (или опускается), что позволяет последовательно просматривать рассеивающую способность отдельных слоев атмосферы, начиная примерно с 20 км над

уровнем моря и выше, пока вообще на фоне неба различим свет, рассеянный в высоких слоях атмосферы.

В двадцатые-сороковые годы ни у кого не возникало сомнений, что за пределами тропосферы атмосферный воздух совершенно чист, и задача зондирования мыслилась как определение высотного хода плотности и температуры воздуха на недоступных тогда иными методами высотах до 100 и даже 300—400 км. Обработка данных сумеречных наблюдений, выполненная в тот период рядом авторов, привела к вполне разумным по порядку величины значениям, согласным с другими косвенными оценками и сыгравшим в свое время важную роль в качестве стимула к пересмотру традиционного представления об изотермической стратосфере⁹⁵. Стремление повысить точность оценок привело в середине сороковых годов к необходимости разобраться в той роли, которую играет в формировании сумерек вторичное рассеяние света. Сложность проблемы такова, что строгого решения ее не удастся получить и донине. Приближенные же оценки, опиравшиеся на различные исходные предположения, оказались крайне противоречивыми, но, в общем, угрожающими для метода в целом, по крайней мере при его применении к высотам более 100 км. Такая неопределенность в дееспособности метода, с одной стороны, и одновременное развитие ракетных методов исследования стратосферы, с другой, надолго отодвинули сумеречный метод на задний план. Однако накопленный с тех пор обильный наблюдательный материал позволяет, по-видимому, сделать вывод, что при надлежащей постановке наблюдений и надлежащей обработке наблюдательных данных можно, изучая сумерки, получать достаточно надежные сведения о рассеивающей способности атмосферы в интервале высот примерно от 20 до 100 км⁹⁶. При этом обращает на себя внимание⁹⁶ крайняя переменчивость яркости, цвета⁹⁷ и поляризации⁹⁸ света сумеречного неба. Переменчивость эта столь велика и столь характерна, что ее можно приписать только одной причине^{44,96} — тому, что в стратосфере на всех высотах, по крайней мере до 80—90 км, т. е. до уровня существования так называемых серебристых облаков⁹¹, основной рассеивающей свет субстанцией является не воздух, а аэрозоль с присущей ему временной и пространственной изменчивостью как по количеству, так и по размерам и по природе частиц. В частности, если этот аэрозоль имеет метеорное происхождение, то его появление должно быть связано с увеличением ионной концентрации, что делает понятной отмеченную Хвостиковым⁹⁸ связь между сумеречными поляризационными аномалиями при высоте сумеречного луча около 80 км и критической частотой отражения радиоволн. Добавим, что оценка концентрации аэрозольных частиц, необходимой для того, чтобы рассеяние на высотах 50—80 км носило аэрозольный характер⁴⁴, приводит к вполне разумным цифрам — порядка $1 \div 10^{-2}$ частиц размером 0,1—0,3 м в куб. см (ср. ⁹⁹). Таким образом, задача сумеречного зондирования стратосферы резко меняется. Теперь это наблюдение за переносом, седиментацией и преобразованием аэрозоля в мезосфере, т. е. исследования по метеорологии крайне больших, приобретших за последние годы практическую важность высот. Значение возрождения сумеречного метода можно оценить, если вспомнить высокую стоимость ракетных исследований, ограничивающую их распространенность, и трудности использования ракетной техники для исследования аэрозоля.

В 1930 г. Синдж (см. ⁵¹) указал на возможность зондирования атмосферы лучом прожектора. Прогресс прожекторной и измерительной техники позволил вскоре реализовать эту возможность, причем «потолок» зондирования неизменно повышался, пока не достиг в пятидесятых годах внушительной цифры — около 70 км. При этом все без исключения

американские исследователи ставили своей целью извлечение из данных зондирования сведений о плотности и температуре воздуха на этих высотах, тогда как в Советском Союзе И. А. Хвостиков уже в 1944 г. отчетливо ориентировал исследования на изучение атмосферного аэрозоля, для чего измерения яркости рассеянного света прожектора были с самого начала дополнены измерениями его поляризации (подробнее см.⁵¹).

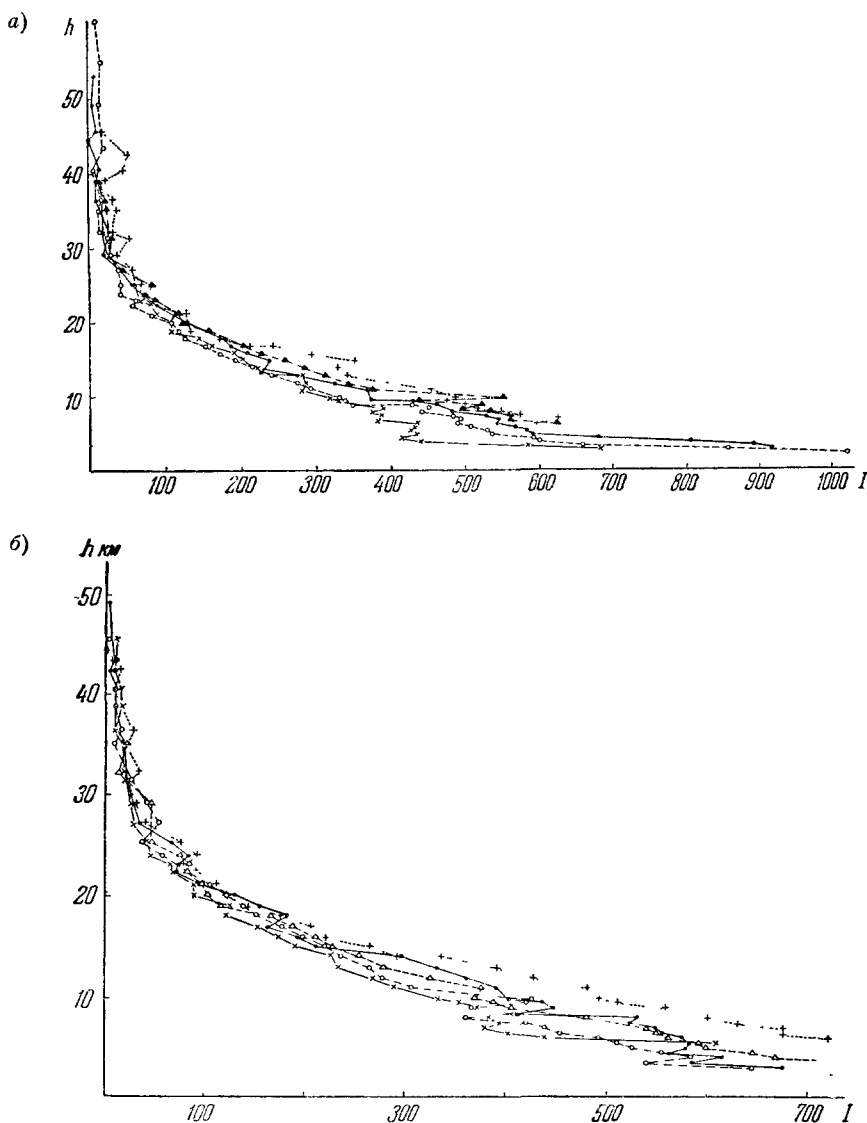


Рис. 19. Зависимость яркости рассеянного света прожектора (в условных единицах) от высоты рассеивающего объема по измерениям для ряда последовательных ночей августа (а) и сентября (б) 1954 г.

За период 1944—1958 гг. Лабораторией атмосферной оптики Института физики атмосферы АН СССР было получено при помощи прожекторного зондирования различными методами и в различных условиях много сотен оптических разрезов атмосферы, позволяющих сделать ряд вполне однозначных выводов⁵¹.

Оказалось, что рассеивающая способность атмосферы даже в самые ясные дни и на всех доступных прожекторному зондированию высотах подвержена сравнительно быстрым и беспорядочным изменениям, по крайней мере в 2—3 раза. Это отчетливо видно, например, из рис. 19, на котором представлены (в условных единицах) интенсивности рассеянного света прожектора в функции высоты рассеивающего объема для двух серий последовательных ночей по наблюдениям в Бакуриани (1954 г.). Почти всегда то на той, то на другой высоте обнаруживаются более или менее отчетливо выраженные слои аэрозоля, нередко имеющие явную облачную структуру и выявляемые как по увеличению яркости рассеянного света прожектора, так и по изменению его поляризации. Пример такого вертикального оптического разреза атмосферы можно видеть

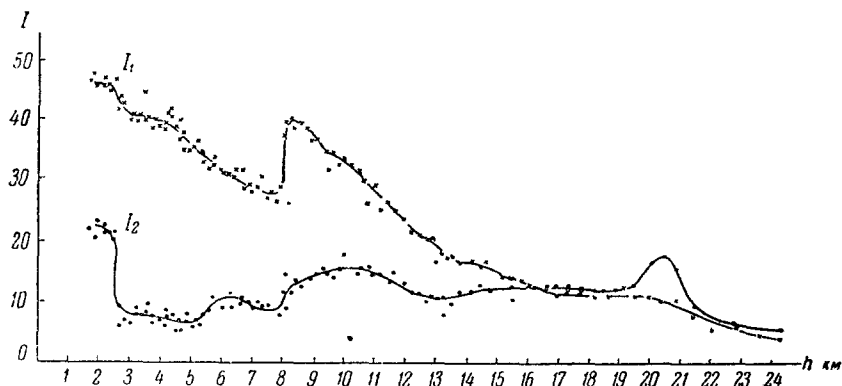


Рис. 20. Зависимость двух взаимно перпендикулярно поляризованных компонент яркости рассеянного света прожектора от высоты рассеивающего объема для одной из ночей.

на рис. 20, на котором представлены для одной из ночей данные измерений интенсивностей двух линейно поляризованных компонент рассеянного света прожектора (I_1 — поляризовано в плоскости рассеяния, I_2 — перпендикулярно ей) в синей области спектра в функции высоты рассеивающего объема. Степень поляризации рассеянного света почти никогда не соответствует закону Релея, а бывает либо меньше, либо больше, причем нередко в аэрозольных слоях поляризация оказывается отрицательной, как это, например, имеет место на рис. 21 на высоте около 22—23 км (по оси ординат справа указаны высоты, а слева соответствующие им углы рассеяния). Отмечается, что аэрозольные слои чаще всего наблюдаются в области тропопаузы (10—12 км в наших широтах) и на высотах 22—25 км, что соответствует обычной высоте появления так называемых перламутровых облаков. В последнем случае данные прожекторного зондирования позволили Дривинг установить, что облака эти образованы переохлажденными водяными каплями и оценить их размеры и концентрацию⁵¹. Отчетливо выраженные аэрозольные слои неоднократно наблюдались и выше, во всяком случае до 40 км. Весьма характерным являются резкие колебания потолка прожекторного зондирования, они могут быть приписаны только сильным колебаниям рассеивающей способности атмосферы на соответствующих высотах (40—70 км), т. е. изменчивости имеющегося там аэрозоля⁵¹, что находится в хорошем согласии с выводами из сумеречных наблюдений.

Итак, данные прожекторного и сумеречного зондирования атмосферы, вместе с данными измерений яркости неба с автостратостатов (§ 6), не оставляют сомнений, что на всех высотах до 80—90 км за рассеяние

света в атмосфере ответствен преимущественно аэрозоль. Попытки определения плотностей и температур воздуха оптическим путем приводили, как известно, к значительному разбросу значений и согласно с данными других методов только по порядку величины. Теперь это может быть объяснено тем, что, в среднем, относительная концентрация аэрозоля мало меняется с высотой и что в видимой области спектра рассеивающая способность атмосферного аэрозоля в среднем близка, по порядку величины, к рассеивающей способности чистого воздуха. Тем самым, единственным реальным результатом оптических исследований атмосферы на всех высотах может быть исключительно (если оставить в стороне исследование селективного поглощения газовой фазой) изучение оптических свойств атмосферного аэрозоля и испытываемых им изменений — переноса, седиментации, кристаллизации, конденсации, испарения и т. п. Это означает, что основной задачей атмосферной оптики становится использование оптических методов для исследования таких важнейших метеорологических процессов, как поименованные, тем более, что пока иных эффективных средств исследования этих процессов не существует (особенно если речь идет о процессах, в которых участвуют субмикроскопические частицы).

Однако мы тут же наталкиваемся на проблему интерпретации данных зондирования. В сущности, стоящие здесь проблемы идентичны проблемам ядерной физики: по матрице рассеяния, по ее угловым и спектральным зависимостям надлежит с максимальной доступной полнотой выявить свойства

рассеивающей среды (природу рассеивающих частиц, их распределение по размерам и т. п.), т. е. нужно уметь решать обратную задачу теории рассеяния света совокупностью разнородных частиц аэрозоля. После сказанного в предыдущих параграфах вряд ли следует добавлять, что в настоящее время состояние теории позволяет проводить такой анализ только в крайне немногочисленных особо благоприятных случаях и в очень ограниченных масштабах, вследствие чего эффективность зондирований пока ничтожна. Чаще всего данные наблюдений хотя и отчетливо выявляют какие-то процессы, но не поддаются интерпретации, лишь увеличивая коллекцию бесплодных загадок. Поэтому

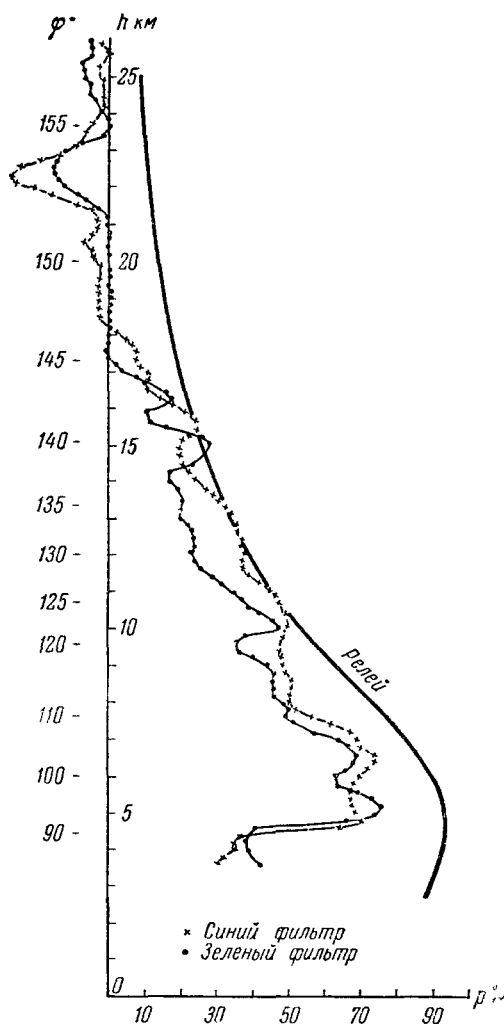


Рис. 21. Зависимость степени поляризации рассеянного света прожектора от высоты рассеивающего объема в двух участках спектра для одной из ночей

центральной задачей современной атмосферной оптики, несомненно, оказывается детальное выяснение законов рассеяния света частицами аэрозоля и в первую очередь капельками воды и ледяными кристаллами, а также их ансамблями с различными законами распределения.

Это — весьма общая задача коллоидной оптики вообще и решаться она должна с привлечением самых совершенных средств современного эксперимента путем прямого сочетания полевых и лабораторных исследований с одновременной разработкой теоретических представлений. Наибольшая трудность состоит в том, что субмикроскопическая фракция аэрозоля, весьма активная в оптическом отношении, не поддается пока детальному изучению иными методами. Это ведет к невозможности прямого сопоставления оптических характеристик среды с ее микрофизическими параметрами, которое может быть возмещено только избыточностью оптической информации, т. е. одновременным кооперированием различных оптических средств исследования для совокупного изучения различных сторон одного и того же явления. Лишь такой комплексный оптический эксперимент в состоянии будет обеспечить репрезентативность и возможность анализа получаемых результатов, а тем самым и создание основ для интерпретации данных оптического зондирования атмосферы.

§ 8. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОБЛАКАХ И ТУМАНАХ И СМЕЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Помимо изучения зависимости матрицы рассеяния от микрофизических характеристик аэрозоля, XX век выдвинул еще один круг проблем, весьма актуальных для атмосферной оптики как с прикладной, так и с теоретической точек зрения. Формулирование уравнения переноса излучения и разработка методов его решения, в частности, с использованием машинной вычислительной техники сделало возможным исследование процессов распространения излучения и радиационных режимов в сильно замутненных средах — облаках, туманах, морях и т. п. Возникнув из запросов атмосферной оптики, в том числе в связи с потребностью прогнозирования видимости, эти проблемы давно переросли ее рамки и получили первостепенное значение в астрофизике и ядерной физике, что не дает нам возможности сколько-нибудь подробно касаться их в рамках этой статьи (см.²¹). Здесь мы можем только бегло упомянуть некоторые вопросы, разрешение которых представляется наиболее существенным с точки зрения понимания атмосферно-оптических явлений.

Тотчас же отметим, что наибольшим препятствием для развития современной теории распространения света в сильно рассеивающих средах оказывается, опять-таки, отсутствие сведений о виде матрицы рассеяния. В результате задача об учете или оценке отнюдь не малых поляризационных эффектов не может быть ни полноценно поставлена, ни сколько-нибудь уверенно решена, за исключением тривиального и заведомо не имеющего отношения к действительности случая релеевского рассеяния. Это сразу же лишает, пусть самые изощренные, теории практического значения и резко ограничивает возможность их сопоставления с данными эксперимента.

Даже функции рассеяния $f_{11}(\varphi)$ для реально существующих полидисперсных систем остаются пока мало изученными как теоретически, так и экспериментально. Вследствие этого все расчеты приходится выполнять применительно к сильно идеализированным схемам и их сопоставления с действительностью неизбежно приобретают грубо качественный, описательный характер, тем более, что экспериментальные данные о световом

режиме в рассеивающей среде крайне бедны. Такая ситуация подчеркивается отсутствием эффективных приближенных методов решения уравнения переноса, позволяющих хотя бы качественно выявлять общие закономерности, что вынуждает теоретиков направлять свои усилия на коллелионирование якобы «строгих» решений более или менее типичных, но, как правило, варварски стилизованных примеров. Поэтому, несмотря на серьезнейший прогресс в этой области, которым отмечены последние полтора десятилетия, положение остается печальным, главным образом из-за полнейшего разрыва между теорией и опытом.

Обращаясь к проблемам, ожидающим своего разрешения, прежде всего необходимо указать на исследование законов отражения света сильно рассеивающими свет образованиями — облаками, снегом, морем, песками, почвами, растительным покровом и т. п. — в зависимости от их микро-структуры, поглощательной способности и углов падения и наблюдения световых пучков. Здесь накоплен уже не малый наблюдательный материал, не находящий пока исчерпывающего теоретического объяснения и обобщения (см. ^{21,39}), тем более необходимого, что оно позволило бы существенно продвинуться в целом ряде практически важных задач.

Далее, необходимы подробные экспериментальные и теоретические исследования светового режима внутри рассеивающей среды — от ее границы до тех глубин, где характер светового режима определяется не условиями освещения, а свойствами самой среды ^{21,39}.

Совершенно неисследованной остается пока вся область трехмерных задач теории переноса. Сюда относятся и теория сумеречных явлений, и теория так называемого «ледяного» и «водяного» неба и в первую очередь обширная и практически важная проблема проникновения прожекторного луча через туман или другую сильно рассеивающую среду ⁵¹. Последняя задача имеет и большое методическое значение, ибо пока остается неясным, в какой мере эффекты многократного рассеяния способны воспрепятствовать интерпретации экспериментов по определению коэффициентов и матриц рассеяния в облаках и туманах, а тем самым неясны и пути для выбора наиболее рациональных измерительных схем.

Упомянем еще об одной из важнейших, с нашей точки зрения, задач современной оптики — создании основ спектроскопии диспергированных веществ путем изыскания способов использования эффектов многократного рассеяния для экспериментального разделения коэффициентов поглощения и рассеяния диспергированной фазы ³⁹. В частности, на этом пути, видимо, следует ожидать получения отсутствующих ныне данных о поглощательной способности облаков и туманов в различных областях спектра.

Реализация названных исследований требует совместных и целеустремленных усилий теоретиков и экспериментаторов, причем, как и в других вопросах рассеяния света, лабораторный эксперимент нередко разумно сочетать с натурными измерениями в облаках, туманах или океанических водах, подчиняя эти измерения строго продуманным общим целям.

§ 9. РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ И ОПТИКА АЭРОЗОЛЯ

В течение веков и до самого недавнего времени цели атмосферной оптики как науки связывались с надеждами непосредственного использования оптических «примет» для прогноза погоды. Об этом выразительно свидетельствует, например, подзаголовок единственного на русском языке курса атмосферной оптики, изданного в 1924 г. Броуновым: «Световые явления неба в связи с предсказаниями погоды». Однако успехи в этой

области оказались минимальными и мы теперь хорошо понимаем почему. Связь оптической ситуации с погодой носит сугубо опосредствованный характер. Метеорологические процессы каким-то, отнюдь еще не ясным нам во всех необходимых деталях образом, сказываются на судьбе и характеристиках атмосферного аэрозоля. Последний в свою очередь оказывает сильнейшее влияние на радиационный и термический режимы атмосферы, а тем самым и на ход метеорологических процессов. Оптическое же состояние атмосферы отражает, в опять-таки не вполне понятном нам пока виде, мгновенное состояние атмосферного аэрозоля. Поэтому путь к использованию оптических «примет» для прогноза погоды лежит, во-первых, через раскрытие зависимости между природой аэрозоля и его оптическими свойствами и, во-вторых, через выявление связей между погодообразующими процессами и процессами переноса и преобразования аэрозоля. Неперспективность же эмпирических поисков разнообразных «примет» достаточно проиллюстрирована историей.

Тем не менее многочисленные и настойчивые поиски в этом направлении не остались бесплодными. Они привели к открытию и познанию огромного количества атмосферно-оптических явлений, и если взглянуть на эту эпоху ретроспективно, то нетрудно убедиться, что именно качественное описание и объяснение всех этих явлений и составляло тогда основное содержание атмосферной оптики. Нетрудно также убедиться, что этот этап изначального накопления фактов и создания общих качественных представлений о природе атмосферно-оптических явлений уже исчерпан. Мы располагаем обширными сведениями об основных оптических характеристиках атмосферы и об их изменчивости в той мере, в какой они доступны при помощи сравнительно простой аппаратуры и несложных теорий, и эти сведения создают надежную основу для общей ориентировки в ходе явлений. Своеобразной эпитафией этому чисто наблюдательному этапу может служить недавно вышедшая у нас книга М. Миннарта «Свет и цвет в природе»⁹¹. Однако нельзя закрывать глаза на то, что само это направление становится архаизмом и уже никак не вмещает основных устремлений современной науки. А эти устремления связаны с переходом от пассивного наблюдения природных явлений к целенаправленному количественному анализу их физической природы и твердо опираются на широкое вторжение в эту область современных физико-математических средств исследования — как экспериментальных, так и теоретических. Прежде всего это проявляется в резком изменении задач и методов исследования.

Наблюдательный аспект атмосферной оптики, разумеется, не утратил своего значения, но мыслится он теперь совершенно иначе. Это — создание радиационной климатологии на основе статистического анализа данных, например, о прозрачности атмосферы в различных участках спектра, получаемых на широкой сети наблюдательных станций при помощи массовой и дешевой измерительной аппаратуры. Целью такого рода регулярной радиационной службы должно быть обеспечение народного хозяйства оперативной и климатологической информацией, позволяющей рационально решать вопросы транспорта, строительства, освещения, агро-техники, курортологии и т. п.

Наряду с этим отчетливо выделяется совершенно независимый и требующий принципиально иного подхода круг проблем, который можно, условно, назвать оптикой аэрозоля и который, в частности, должен открыть дорогу для изучения метеорологических процессов оптическими средствами.

Первоочередные стоящие здесь задачи уже были упомянуты выше. Это — изучение угловых и спектральных зависимостей матрицы рассея-

ния, как путь к выявлению микроструктуры аэрозоля, и изучение законов распространения излучения в сильно рассеивающих средах. Однако в реальной атмосфере мы встречаемся с двумя обстоятельствами, предопределяющими пути исследования. Во-первых, это постоянная и неконтролируемая изменчивость атмосферы как объекта исследования, не позволяющая воспроизводить условия измерения. Во-вторых, это присутствие субмикроскопической фракции, оптически очень активной, но не поддающейся идентификации иными методами. Поэтому современный атмосферно-оптический эксперимент приобретает весьма специфические черты. Это должно быть комплексное, крайне разностороннее оптическое исследование отдельных частных случаев, когда объем получаемой оптической и прочей вспомогательной информации столь велик, что допускает однозначный теоретический анализ как в смысле идентификации параметров рассеивающей среды, так и в отношении сопоставления ее различных оптических свойств. Разумеется, такое полноценное комплексирование может быть достигнуто только путем использования наиболее совершенных средств современной измерительной техники и требует серьезного концентрирования усилий высококвалифицированных коллективов ученых на отдельных сравнительно узких и четко определенных сторонах проблемы. Вот эта-то комплексность и целеустремленность исследований и является наиболее характерной чертой современных проблем оптики аэрозоля. В то же время очевидно, что изолированные эксперименты в этом направлении, со сколь бы совершенной аппаратурой они ни выполнялись, приведут лишь к пополнению коллекции наблюдавшихся случаев, но не помогут продвинуться в понимании физических закономерностей.

Вполне естественно, что лабораторные исследования по коллоидной оптике послужат необходимым дополнением к натурным измерениям, но, как и в прежние времена, они не смогут заменить их, ибо масштаб атмосферы позволяет наблюдать, при современной технике измерений, некоторые явления, еще не доступные в лабораторных условиях. Поэтому атмосферная оптика, при правильном понимании ее задач, по-прежнему сохраняет свои позиции одного из передовых форпостов в изучении рассеяния света и его распространения в рассеивающих средах, а этот круг вопросов несомненно относится к числу основных проблем современной оптики вообще.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. M. Pertner, F. M. Exner, *Meteorologische Optik*, Wien, 1910.
2. П. И. Броунов, *Атмосферная оптика*, Гостехиздат, 1924 г.
3. См., например, Розенбергер, *История физики*, т. 1, Гостехиздат.
4. I. Kepler, *Ad Vittelionem paralipomena*, Франкфурт, 1604.
5. Lionardo da Vinci, *Trattato della pittura*, CXIII и CLI.
6. И. Ньютон, *Оптика*, книга II, часть III, предложение VII, Гостехиздат, 1954 г.
7. Л. Эйлер, *Письма к немецкой принцессе*, т. I.
8. J. W. Goethe, *Entwurf einer Farbenlehre. Didaktische Teil.*, 145—172, *Goethes Werke*, II Abteilung, Bd. I., Weimar.
9. R. Clausius, *Pogg. Ann.* 72, 76, 84 (1847—51).
10. Chaptal, *Compt. rend.* 91, 522 (1880).
11. W. Spring, *Bull. l'Acad. Bruxelles*, 504 (1898).
12. A. Lalleman, *Compt. rend.* 69, 18, 9, 282, 917, 1294 (1869); 75, 709 (1872); 79, 693 (1874).
13. Hartley, *Nature* 39, 474 (1889).
14. W. M. Sohn, *Gerl. Beitr. z. Geophys.* 37, 198 (1932).
15. H. A. Miley, E. H. Cullington a. J. F. Bedinger, *Trans. Amer. Geophys. Union* 34, 680 (1953).
16. W. H. Pickering, *Metheorol. Zs.* 514 (1885).
17. O. Aufsess, *Die Farbe der Seen*, München, 1903.

18. W. B. Pietsenpol, Trans. Wisconsin Acad. Sci. 19, 562.
19. C. V. Raman, Proc. Roy. Soc. 101, 64 (1922).
20. В. В. Шулейкин, Известия Ин-та физики и биофизики, 1922 г., стр. 119.
21. См., например, В. В. Соболев, Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет, Гостехиздат, 1956 г.; С. Чандрасекар, Перенос лучистой энергии, ИЛ, 1953.
22. J. Müller, Lehrbuch d. Kosm. Physik 1883, стр. 403.
23. B. de Saussure, Mem. de l'Acad. de Turin, 1790; J. de phys. 38, 199 (1791).
24. E. Brücke, Pogg. Ann. 88, 363 (1852).
25. G. Gavi, Compt. rend. 51, 360, 669 (1860).
26. D. Tindall, Proc. Roy. Soc. Lond. 17, 223 (1869).
27. R. Clausius, Pogg. Ann. 88, 554 (1853).
28. F. Arago, Oeuvres, Paris, 1858, t. 7, 10.
29. D. Brewster, Philos. Mag. 33, 290 (1867).
30. M. I. Strutt, Philos. Mag. 41 (4), 107, 274, 447 (1871); Philos. Mag. 12 (5), 81 (1881).
31. Rayleigh, Philos. Mag. 47 (5), 375 (1899).
32. Л. И. Мандельштам, Полное собрание трудов, Изд. АН СССР, т. I, стр. 104.
33. M. Smoluchowski, Ann. Physik 25, 205 (1908); A. Einstein, Ann. Physik 33, 1275 (1910).
34. Maxwell-Garnett, Philos. Trans. 203A, 385 (1904), 205A, 237 (1906).
35. A. E. Love, Proc. London Math. Soc. 30, 308 (1899).
36. G. Mie, Ann. Physik 25, 377 (1908).
37. Г. В. Розенберг, Некоторые вопросы распространения электромагнитных волн в мутных средах. Диссертация, Москва, 1954 г.
38. Г. В. Розенберг, УФН 56, № 1, 77 (1955).
39. Г. В. Розенберг, УФН 69, № 1, 57 (1959).
40. Van der Hulst, Light Scattering by Small Particles, London, 1957.
41. G. Stokes, Trans. Cambr. Philos. Soc. 9, 339 (1852).
42. G. Jones, J. Opt. Soc. Amer. 31, 488, 433, 500 (1941); 32, 486 (1942); 37, 107, 110 (1947).
43. F. Perrin, J. Chem. Phys. 10, 415 (1942).
44. Г. В. Розенберг, Особенности поляризации света, рассеянного атмосферой в условиях сумеречного освещения. Диссертация, Москва, 1946 г.
45. S. Chandrasekhar, Astrophys. J. 105, 424 (1946).
46. В. В. Соболев, Уч. зап. ЛГУ, № 16 (1949).
47. Fano, J. Opt. Soc. Amer. 39, 859 (1949).
48. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Квантовая механика, Гостехиздат, 1948 г.
49. Г. В. Розенберг, ЖОС 5, № 4, 440 (1958).
50. К. С. Шифрин, Рассеяние света в мутной среде, Гостехиздат, 1951 г.
51. Ю. С. Георгиевский, А. Я. Дрининг, Н. В. Золотавина, Г. В. Розенберг, Е. М. Фейгельсон, В. С. Хазанов, под общей редакцией проф. Г. В. Розенберга, Проекторный луч в атмосфере, Изд. АН СССР, 1960 г.
52. М. В. Волькенштейн, Молекулярная оптика, Гостехиздат, 1951 г.
53. R. Penndorf, J. Opt. Soc. Amer. 47, № 2 (1957).
54. Ж. Перрен, Атомы, ОНТИ, 1932 г.
55. J. Stratton, H. Houghton, Phys. Rev. 38, 159 (1931); H. Houghton, W. Chalker, J. Opt. Soc. Amer. 39, 955 (1949).
56. A. et E. Vassu, J. phys. 10, 75, 403, 459 (1939).
57. С. Ф. Родionoв, Е. Н. Павлова, Е. В. Рдутловская и Н. М. Рейнов, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 135 (1942).
58. Г. П. Фарафонова, Труды ЦАО, № 23, 52 (1957); № 32 (1959).
59. И. А. Хвостиков, УФН 24, № 2, 165 (1940).
60. Л. М. Левин, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 10 (1958).
61. К. С. Шифрин, Тр. Всес. заочн. Лесотехн. ин-та, № 1 (1955).
62. В. А. Малышев, Труды X Совещания по спектроскопии, Львов, 1956 г.
63. Н. Пильчиков, Compt. rend. 115, 555 (1892).
64. Ch. Jensen, Himmelstrahlung, Handb. Physik 19 (1928).
65. C. Dorn, Himmelshelligkeit, Himmelspolarisation und Sonnenintensität in Davos 1911 bis 1918. Veröffent. d. Preuss. Meteorol. Inst. Abh. 6, № 303 (1919).
66. C. Dorn, Physik d. Sonnen und Himmelstrahlung, Braunschweig, 1919.
67. F. Roggenkamp, Meteorol. Zs. 50, 111 (1933).
68. R. Rubenson, Memoire sur la polarisation de la lumiere atmospherique, Upsala, 1864.
69. J. L. Soret, Ann. chim. et phys. 503 (1888); Arch. sci. phys. et natur. 20, 439 (1888).
70. F. Ahlgrimm, Jahrb. d. Hamburg. Wiss. Anstalten 32 (1914).

71. И. И. Тихановский, *Phys. Zs.* 28, 252 (1927).
72. М. В о г н, *Verhandl. Phys. Ges.* 19, 43 (1917); 20, 16 (1918).
73. I. M. S t r u t t, *Proc. Roy. Soc.* 95, 155 (1918).
74. J. C a b a n n e s, *Ann. phis.* 15, 5 (1921); *La diffusion moleculaire de la lumiere*. Paris, 1929.
75. М. Б о р н, *Оптика*, ОНТИ, 1933 г.
76. М. А. S c h i r m a n n, *Ann. Physik* 59, 493 (1919); 61, 195 (1920).
77. Г. В. Р о з е н б е р г, *Известия АН СССР, сер. географ. и геофиз.* 13, 154 (1949).
78. M. S. C h a n d r a s e k h a r, D. E l b e r t, *Trans. Amer. Phylos. Soc.* 44, 642 (1954).
79. Z. S e k e r a, *Handb. Phys.* 48, *Geophys.* 11, 288 (1957).
80. Ю. Н. Л и н с к и й, Доклад на Совещании по актинометрии и атмосферной оптике, Ленинград, 1959 г.
81. Е. В. П я с к о в с к а я - Ф е с е н к о в а, Исследование рассеяния света в земной атмосфере, Изд. АН СССР, 1957 г.
82. Е. М. Ф е й г е л ь с о н, *Изв. АН СССР, сер. геофиз.*, № 10 (1958).
83. В. Г. К а с т р о в, *Тр. ЦАО*, № 32 (1959).
84. В. Ф. Б е л о в, *Тр. ЦАО*, № 23 (1957); Б. А. Ч а я н о в, *Труды ЦАО*, № 32 (1959).
85. Е. С. К у з н е ц о в, *Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз.*, № 5, 247 (1943).
86. Е. С. К у з н е ц о в, *Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз.* 9, № 3, 204 (1945); Е. М. Ф е й г е л ь с о н, М. С. М а л к е в и ч, С. Я. К о г а н, Т. Д. К о р о п а т о в а, К. С. Г л а з о в а, М. А. К у з н е ц о в а, Расчет яркости света в атмосфере при анизотропном рассеянии, Изд-во АН СССР, 1958; К. С. Ш и ф р и н и И. П. П я т о в с к а я, Таблицы наклонной дальности видимости и яркости дневного неба, Гидрометиздат, 1959 г.
87. W. D. C h e s t e r m a n, W. S. S t i l e s, *Symposium on searchlights*, *Illum. Engng. Soc., London*, 1948.
88. О. Д. Б а р т е н ь е в а, Доклад на Совещании по актинометрии и атмосферной оптике, Ленинград, 1959 г.
89. Г. В. Р о з е н б е р г и И. М. М и х а й л и н, *ЖОС* 5, № 6, 671 (1958).
90. R. O. G u m p r e c h t, C. M. S l i e p s e v i c h, *J. Phys. Chem.* 57, № 1 (1953); J. H. C h i n, C. M. S l i e p s e v i c h, M. T r i b u s, *J. Phys. Chem.* 59, № 9 (1955); К. С. Ш и ф р и н, *Тр. Заочн. лесотехнич. ин-та*, № 2 (1956).
91. М. М и н н а р т, *Свет и цвет в природе*, Физматгиз, 1959 г.
92. B e z o l d, *Pogg. Ann.* 123, 240 (1863).
93. В. Г. Ф е с е н к о в, *Тр. Главн. Российск. астрофизич. observ.* 2, 7 (1923).
94. В. Г. Ф е с е н к о в, *Астроф. ж.* 7, № 2, 100 (1930).
95. Например, Т. Г. М е г р е л и ш в и л и и И. А. Х в о с т и к о в, *ДАН СССР* 59, № 7 (1948).
96. Г. В. Р о з е н б е р г, *Анатомия зари. Доклад на Совещании по актинометрии и атмосферной оптике*, Ленинград, 1959 г.
97. Например, Т. Г. М е г р е л и ш в и л и, *ДАН СССР* 53, 127 (1946); 55, 713 (1947); Доклад на Совещании по актинометрии и атмосферной оптике, Ленинград, 1959 г.
98. См., например, Г. В. Р о з е н б е р г, *Тр. Геофиз. ин-та АН СССР*, № 12, 35 (1949).
99. Ф. Х. Л у д л а м, *УФН* 65, № 3, 407 (1958).

